



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ COMPOST ΣΤΗΝ ΔΟΜΗ ΤΟΥ
ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΣΤΑ ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ -
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΛΙΑΣ ΧΑΝΙΩΝ*

ΝΙΚΟΛΑΟΣ – ΧΡΗΣΤΟΣ ΒΑΒΛΑΣ

A.M. : 2008050027

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ)

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΛΟΓΕΡΑΚΗΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2013

ΑΦΙΕΡΩΝΕΤΑΙ

Στον παππού μου

Νικόλαο Κώστα

Αγρότης (1913-2005)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με αυτή την εργασία ολοκληρώθηκε ο κύκλος των προπτυχιακών μου σπουδών στο τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης στις οποίες είχα την στήριξη από πολλά άτομα που θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων στην διπλωματική, Καθηγητή του της σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Νικόλαο Νικολαΐδη για την ανάθεση του θέματος και για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου πρόσφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Μανώλη Κοτρωνάκη , που με την καθοδήγηση και την υπομονή του μου έδωσε τις απαραίτητες γνώσεις για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Νικόλαο Παρανυχιανάκη για τις συμβουλές του, την συμμετοχή του στην δειγματοληψία και για τον χρόνο της μελέτης και παρουσίασης της εργασίας και τον καθηγητή κ. Νικόλαο Καλογεράκη για την συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή και το χρόνο που διέθεσε για τη μελέτη και παρουσίαση της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ όλα τα μέλη του εργαστηρίου υδρογεωχημικής μηχανικής και αποκατάστασης εδαφών (HERS LAB) την σημαντική η βοήθεια που μου προσφέρθηκε. Ειδικότερα από την Μαρία-Λιλιάννα Σαρού και Στέλλα Βουτσαδάκη, (υπεύθυνοι του Εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών) στο εργαστηριακό κομμάτι της μελέτης που με την πολύτιμη καθοδήγηση τους και συντέλεσαν την ολοκλήρωση των εργαστηριακών υποχρεώσεων. Επίσης την Σωτηρία Πανακούλια, Γιώργο Γιαννάκη για την συμμετοχή τους στην δειγματοληψία και για τις πολύτιμες συμβουλές τους και τον Διονύση Ευσταθίου και την Μυρτώ Τσικνιά για τα δεδομένα και συμβουλές που μου έδωσαν.

Ανεκτίμητη επίσης ήταν τόσο η βοήθεια όσο και η συμπαράσταση όλων των φίλων και συμφοιτητών μου που στάθηκαν δίπλα μου στα πέντε χρόνια σπουδών και ιδιαίτερος θέλω να ευχαριστήσω την Ε. Πυλούδη, την Ι. Παναγέα, τον Γ. Γκουντάνη και το Ν. Γκούφα που συνετέλεσαν με την υποστήριξή τους στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, θα ήταν μεγάλη μου παράλειψη αν δεν ευχαριστούσα εγκάρδια τους γονείς μου και τον αδερφό μου που χωρίς την υποστήριξη και τις υποδείξεις τους δε θα πετύχαινα το βέλτιστο που μπορούσα.

ABSTRACT

Carbon plays major role on soils as it takes part in important processes for its function. It is of utmost importance to study the influence of carbon on soils, while the gradual degradation of the soils due to wrong cultivated practices is a reality. In the present thesis, initially, samples of four fields in Milia (one region of Chania), which are cultivated at different time periods and compost applied in them before each cultivable period, were analyzed. The samples were analyzed in order to find the initial conditions before the application of compost and soil conditions after different cultivation practices relating to the periodicity of the application of compost.

Overall, measurements of pH, electrical conductivity, particle size, wet screening, isolation of aggregates, sand correction and measurement of organic carbon, nitrogen and total soil carbon were carried out.

Afterwards, the data are imported to CAST Model, which processes them taking under consideration some additionally parameters such as meteorological data, vegetation etc. The results indicate the status of the fields during the years, providing time series about the distribution of the aggregates, organic carbon, clay-sludge fraction, porosity and bulk density. The calibration of the model gives the opportunity to simulate the experimental measurements, so that the values provided by the model to reflect reality.

Finally, by introducing different management practices in the model, there is an opportunity to calculate the situation without using compost, the optimal dose of compost to maintain the quality, the restoration of the soil to its original state after intensive cultivation and the relation between the compost dose and time of restoration.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο άνθρακας είναι σημαντικός για το εδάφους καθώς παίρνει μέρος σε διεργασίες σημαντικές για την λειτουργία του. Είναι επιτακτική η ανάγκη για μελέτη της επιρροής του στα εδάφη, καθώς έχει αναγνωριστεί η σταδιακή υποβάθμιση τους λόγω των λανθασμένων πρακτικών καλλιέργειας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία για να μελετηθεί ο εδαφικός άνθρακας, αρχικά έγινε ανάλυση δειγμάτων τεσσάρων χωραφιών από την περιοχή της Μηλιάς Χανίων, τα οποία καλλιεργούνται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και υπάρχει εφαρμογή compost πριν από κάθε καλλιεργήσιμη περίοδο. Τα δείγματα επεξεργάστηκαν ώστε να βρεθούν οι αρχικές συνθήκες πριν την εφαρμογή και οι συνθήκες μετά από τις διάφορες καλλιεργητικές πρακτικές που αφορούν την περιοδικότητα της εφαρμογής του compost.

Συνολικά, έγιναν μετρήσεις pH, ηλεκτρικής αγωγιμότητας, κοκκομετρίας, υγρής κοσκίνισης, απομόνωσης των συσσωματωμάτων, διόρθωσης άμμου και μέτρηση του οργανικού άνθρακα, αζώτου καθώς και του συνολικού άνθρακα του εδάφους.

Έπειτα έγινε η εισαγωγή δεδομένων στο CAST Model, το οποίο τα επεξεργάστηκε λαμβάνοντας υπόψη του και άλλες παραμέτρους όπως μετεωρολογικά δεδομένα, φυτοκάλυψη κ.α. Τα αποτελέσματα του μοντέλου μας δείχνουν την κατάσταση των χωραφιών κατά την διάρκεια των ετών παρέχοντας χρονοσειρές κατανομών των συσσωματωμάτων, εδαφικού οργανικού άνθρακα, κλάσματος ιλύος-αργίλου, πορώδους και φαινόμενης πυκνότητας. Με την βαθμονόμηση του μοντέλου γίνεται εφικτή η προσομοίωση των πειραματικών μετρήσεων, ώστε οι τιμές που παρέχει το μοντέλο να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Τέλος, με εισαγωγή διαφορετικών πρακτικών διαχείρισης δόθηκε η ευκαιρία να υπολογιστεί η κατάσταση χωρίς χρήση εδαφοβελτιωτικού, η βέλτιστη δόση εδαφοβελτιωτικού για την διατήρηση της ποιότητας, την αποκατάσταση του εδάφους στην αρχική κατάσταση μετά από εντατική καλλιέργεια και την σχέση της ποσότητας του compost που εισάγεται με το χρόνο αποκατάστασης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	2
2.1	ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	2
2.1.1	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ	3
2.1.2	ΠΟΙΟΤΗΤΑ	3
2.1.3	ΑΠΕΙΛΕΣ.....	5
2.2	ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΥΛΗ ΣΤΑ ΕΔΑΦΗ	8
2.2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	8
2.2.2	ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	9
2.2.3	ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΕΧΕΙ Η ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΥΛΗ.....	10
2.3	ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΥΛΗΣ ΣΤΑ ΕΔΑΦΗ	12
2.3.1	ΤΡΟΠΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ.....	13
2.3.2	ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ.....	20
2.3.3	ΣΧΕΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ , ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ & ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΥΛΗΣ	21
2.3.4	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΑ ΕΔΑΦΗ	22
2.4	ΕΔΑΦΟΣ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	26
3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	29
3.1	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	29
3.2	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ	32

4	ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	34
4.1	ΥΓΡΑΣΙΑ.....	34
4.2	ΜΕΤΡΗΣΗ pH & ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ (EC)	34
4.3	ΚΟΚΟΜΕΤΡΙΑ.....	35
4.4	ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ (WSA)	37
4.5	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΑΜΜΟΥ	39
4.6	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΝ	41
4.7	ΜΕΤΡΗΣΗ TOC.....	44
4.8	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	47
5	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	54
5.1	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	54
5.2	ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	55
5.3	ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ	56
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	58
6.1	1 ^ο ΧΩΡΑΦΙ.....	59
6.2	2 ^ο ΧΩΡΑΦΙ.....	65
6.3	3 ^ο ΧΩΡΑΦΙ.....	71
6.4	ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ	77
6.4.1	ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟΥ.....	77
6.4.2	ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	80

6.4.3	ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	83
6.4.4	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ COMPOST ΜΕ ΧΡΟΝΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	86
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	88
8	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΜΕΛΕΤΗ	90
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91
10	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	97

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 4-1 Κοκκομετρία δείγματος <2mm.....	48
Γράφημα 4-2 Κατανομή των συσσωματωμάτων	49
Γράφημα 4-3 Κατανομή ιλύος-αργίλου στα κλάσματα	51
Γράφημα 4-4 Τιμές οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (tn/ha).....	52
Γράφημα 6-1 Κατανομή WSA (1 ^ο χωράφι)	59
Γράφημα 6-2 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (1 ^ο χωράφι)	60
Γράφημα 6-3 Κατανομή αργίλου και ιλύος στα κλάσματα (1 ^ο χωράφι)	61
Γράφημα 6-4 Κατανομή οργανικού άνθρακα στην άργιλο και ιλύ (1 ^ο χωράφι)	62
Γράφημα 6-5 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα του AC3 (1 ^ο χωράφι)...	63
Γράφημα 6-6 Πορώδες και πυκνότητα εδάφους (1 ^ο χωράφι)	64
Γράφημα 6-7 Κατανομή WSA (2 ^ο χωράφι)	65
Γράφημα 6-8 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (2 ^ο χωράφι)	66
Γράφημα 6-9 Κατανομή αργίλου και ιλύος στα κλάσματα (2 ^ο χωράφι)	67
Γράφημα 6-10 Κατανομή οργανικού άνθρακα στην άργιλο και ιλύ (2 ^ο χωράφι)	68
Γράφημα 6-11 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα του AC3 (2 ^ο χωράφι).69	
Γράφημα 6-12 Πορώδες και πυκνότητα εδάφους (2 ^ο χωράφι)	70
Γράφημα 6-13 Κατανομή WSA (3 ^ο χωράφι)	71
Γράφημα 6-14 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (3 ^ο χωράφι)	72
Γράφημα 6-15 Κατανομή αργίλου και ιλύος στα κλάσματα (3 ^ο χωράφι)	73

Γράφημα 6-16 Κατανομή οργανικού άνθρακα στην άργιλο και ιλύ (3 ^ο χωράφι)	74
Γράφημα 6-17 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα του AC3 (3 ^ο χωράφι) .	75
Γράφημα 6-18 Πορώδες και πυκνότητα εδάφους (3 ^ο χωράφι)	76
Γράφημα 6-19 Κατανομή WSA σε χωράφι χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού	77
Γράφημα 6-20 Κατανομή του οργανικού άνθρακα σε χωράφι χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού.....	78
Γράφημα 6-21 Όρια SOC συναρτήσει του κλάσματος ιλύς-αργίλου	79
Γράφημα 6-22 Κατανομή συσσωματωμάτων, πρακτική διαχείρισης (0,6tn C/ha)....	80
Γράφημα 6-23 Κατανομή οργανικού άνθρακα, πρακτική διαχείρισης (0,6tn C/ha) ..	81
Γράφημα 6-24 Κατανομή συσσωματωμάτων, πρακτική διαχείρισης (2,4 tn C/ha) ...	82
Γράφημα 6-25 Κατανομή οργανικού άνθρακα, πρακτική διαχείρισης (2,4 tn C/ha) .	83
Γράφημα 6-26 Κατανομή συσσωματωμάτων, σενάριο επαναφοράς και διατήρισης κατάστασης εδάφους	84
Γράφημα 6-27 Κατανομή οργανικού άνθρακα, σενάριο επαναφοράς και διατήρισης κατάστασης εδάφους	85
Γράφημα 6-28 Αναγκαίοι μήνες μέχρι την επαναφορά την αρχική κατάσταση συναρτήσει της ποσότητας εδαφοβελτιωτικού που εισάγεται.....	86

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1 Κύκλος των μακρο-συσσωματωμάτων: διεργασία σχηματισμού και καταστροφής τους (Grandy and Neff, 2008)	15
Εικόνα 2-2 Τρόπος σχηματισμού συσσωματωμάτων (Jastrow, 2007).	18
Εικόνα 2-3 Διαδικασία σχηματισμού των συσσωματωμάτων (Stamati et al., 2013b)	20
Εικόνα 3-1 Σχιστόλιθος ("Schist," 2005)	30
Εικόνα 3-2 Χαλαζίτης ("Quartzite," 2005)	30
Εικόνα 3-3 Φυλλίτης (Alden, 2013)	31
Εικόνα 3-4 Δειγματοληψία	32
Εικόνα 3-5 Από αριστερά προς δεξιά : 1 ^ο , 2 ^ο , 3 ^ο χωράφι δειγματοληψίας	33
Εικόνα 4-1 Ανάδευση δειγμάτων για κοκκομετρία	36
Εικόνα 4-2 πειραματική διάταξη κοκκομετρίας	37
Εικόνα 4-3 Δείγμα εδάφους στο κόσκινο 2 mm σε ηρεμία	37
Εικόνα 4-4 Έδαφος στο κόσκινο των 53 μm	38
Εικόνα 4-5 Τα 4 κλάσματα που δημιουργήθηκαν	38
Εικόνα 4-6 Απεικόνιση διάταξης κοσκίνων στη διόρθωση άμμου	40
Εικόνα 4-7 Άμμος στο δείγμα >2mm	40
Εικόνα 4-8 Δείγμα 53-250 μm	41
Εικόνα 4-9 Κλάσματα δείγματος (TUC HERS LAB, 2012)	42

Εικόνα 4-10 Προσθήκη $K_2Cr_2O_7$ στα δείγματα	46
Εικόνα 4-11 Τύποι εδαφών σε σχέση με τα ποσοστά άμμου-ιλύος-αργίλου (USDA)	48
Εικόνα 5-1 Σχέση μεταξύ των μεταβλητών του μοντέλου (Stamati et al., 2013a)	54

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4-1 Υγρασία δειγμάτων	47
Πίνακας 4-2 pH & EC.....	47
Πίνακας 4-3 Κοκκομετρία	47
Πίνακας 4-4 Ποσοστά συσσωματωμάτων.....	49
Πίνακας 4-5 Τιμές τυπικού σφάλματος WSA	49
Πίνακας 4-6 Υπολογισμός μάζας ιλύος-αργίλου% στην περίπτωση του αρχικού δείγματος (C)	50
Πίνακας 4-7 συσσωματώματα με διόρθωση άμμου	50
Πίνακας 4-8 Τυπικό σφάλμα στην διόρθωση άμμου στα WSA	51
Πίνακας 4-9 Μετρήσεις άνθρακα και αζώτου.....	52
Πίνακας 4-10 Τιμές οργανικού άνθρακα στα κλάσματα.....	52
Πίνακας 5-1 Ρυθμοί αποδόμησης στην βαθμονόμηση του μοντέλου	56
Πίνακας 5-2 Ποσοστιαία συνεισφορά των συστατικών στα συσσωματώματα	57
Πίνακας 5-3 Άλλοι παράμετροι βαθμονόμησης	57
Πίνακας 6-1 % μείωση χρόνου σε σχέση με 2,4 tn OC/ha/yr (τιμή διατήρησης)	87
Πίνακας 6-2 Ποσοστό μείωσης χρόνου επαναφοράς συναρτήσει της μεταβολής του compost	87

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αγροτικές πρακτικές που χρησιμοποιούνται στην κτηνοτροφία και στη γεωργία και η εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής κατά τη διάρκεια των προηγούμενων 60 χρόνων έχουν επηρεάσει τις λειτουργίες του εδαφικού οικοσυστήματος, προκαλώντας πολλές φορές μάλιστα την κατάρρευση της λειτουργικότητάς του και δυσμενείς επιπτώσεις στην 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 της υπερβόσκησης, 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 (Nikolaidis, 2011).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των αλλαγών που προκαλεί η προσθήκη οργανικής ύλης σε καλλιεργήσιμο έδαφος και ανάδειξη της σημαντικότητας της οργανικής ουσίας στην ποιότητα του. Με την ανάλυση των χαρακτηριστικών (φυσικών και χημικών) του εδάφους και κυρίως με την μέτρηση του οργανικού άνθρακα (SOM) και την ενσωμάτωση του, έγινε η μοντελοποίηση του κάνοντας δυνατή την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την συμπεριφορά και την σωστή διαχείριση του, με σκοπό την διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Ως έδαφος ορίζεται το ανώτερο στρώμα του φλοιού που τοποθετείται μεταξύ του βραχώδους υποστρώματος και της επιφάνειας της γης, εξαιρουμένου του νερού, είναι ένα από τα πιο σημαντικά τμήματα του φυσικού περιβάλλοντος και σε μεγάλο βαθμό μη ανανεώσιμο και είναι ο δεύτερος πιο σημαντικός φυσικός πόρος μετά από το νερό. Στο τμήμα του εδάφους υπάρχει ανόργανη και οργανική ύλη, νερό, αέρας και ζωντανοί οργανισμοί (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006). Αποτελεί τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ γης, αέρα και υδάτινων πόρων και φιλοξενεί το μεγαλύτερο μέρος της βιόσφαιρας (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006).

Καθώς ο σχηματισμός του εδάφους είναι μία διεργασία εξαιρετικά αργή, το έδαφος ουσιαστικά θεωρείται μη ανανεώσιμος πόρος ο οποίος, όμως, μας εξασφαλίζει τροφή, βιομάζα και πρώτες ύλες, χρησιμεύει ως πλαίσιο για τις δραστηριότητές μας, υπεισέρχεται στη διαμόρφωση τοπίου, αποτελεί συνιστώσα του φυσικού πλούτου και διαδραματίζει κεντρικό ρόλο ως παρακαταθήκη ενδιαιτημάτων και γονιδίων. Αποθηκεύει, διηθεί και μετασχηματίζει πολλές ουσίες, μεταξύ των οποίων είναι το νερό, τα θρεπτικά συστατικά και ο άνθρακας (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006). Περιέχει μάλιστα το μεγαλύτερο αποθεματικό άνθρακα στον κόσμο (1500 γιγατόνους) (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006). Είναι ένα άκρως περίπλοκο και μεταβλητό μέσο καθώς έχουν εντοπιστεί περισσότεροι από 320 βασικοί τύποι εδάφους στην Ευρώπη, και σε κάθε τύπο υπάρχει τεράστιος αριθμός παραλλαγών από πλευράς φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006).

2.1.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ

Οι αγροτικές πρακτικές που στοχεύουν στην ολοένα και αυξανόμενη, λόγω της αύξησης του πληθυσμού, ανάγκη για πρωτογενή παραγωγή λαμβάνουν χώρα στην κρίσιμη ζώνη του εδάφους.

Ως κρίσιμη ζώνη του εδάφους ορίζεται το ανώτερο στρώμα του φλοιού της γης που υπάρχει μεταξύ του βραχώδους υποστρώματος και της άνω άκρης των δέντρων (Brantley et al., 2006) και παρουσιάζει μία σειρά από καθοριστικές περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές λειτουργίες (Blum, 2005).

Λειτουργίες του εδάφους:

- 1) παραγωγή τροφίμων και βιομάζας
- 2) αποθήκευση, διήθηση, μετασχηματισμός ανόργανων και οργανικών συστατικών, μεταξύ των οποίων το νερό και ο άνθρακας
- 3) διατήρηση βιοποικιλότητας και εξασφάλιση οικολογικού ενδιαφέροντος για διάφορους οργανισμούς
- 4) πηγή πρώτων υλών
- 5) διασφάλιση φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος

2.1.2 ΠΟΙΟΤΗΤΑ

Η συζήτηση για την ποιότητα του εδάφους εστιάζει στα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους που επηρεάζονται από τις διαχειριστικές πρακτικές.

- Δυναμικά χαρακτηριστικά είναι αυτά που αλλάζουν σε χρόνους ανθρώπινης ζωής, όπως η βιολογική δραστηριότητα τα δομικά χαρακτηριστικά, η κίνηση των θρεπτικών και του νερού.

- Τα εγγενή χαρακτηριστικά είναι αυτά που αλλάζουν σε γεωλογικούς χρόνους όπως, η υφή, η κλίση του εδάφους η ορυκτολογική σύσταση και το βάθος.

Η ποιότητα του εδάφους επηρεάζει την βιωσιμότητα και την παραγωγικότητα των εκάστοτε χρησιμοποιούμενων εκτάσεων. Για τη βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων του εδάφους απαιτείται να υπάρχει μια κατάσταση ισορροπίας μεταξύ της χρήσης των λειτουργιών του εδάφους για αύξηση της παραγωγικότητας, της ποιότητας του περιβάλλοντος και της υγείας των ζώων και των φυτών που ζουν σε αυτό (Doran, 2002).

Οι Doran και Parkin (1994) και οι Doran και Safley (1997) αρχικά διαφοροποιούνταν μεταξύ του όρου 'ποιότητα του εδάφους' και του όρου 'υγεία του εδάφους' πριν να καταλήξουν να χρησιμοποιούν σφαιρικά τον όρο 'υγεία του εδάφους' και να τον καθορίσουν ως *‘τη συνεχόμενη ικανότητα του εδάφους να έχει ζωτική σημασία, μέσα στα όρια οικοσυστήματος και των πεδίων που χρησιμοποιούνται για καλλιέργεια, να διατηρεί τη βιολογική παραγωγή, να προβιβάζει την ποιότητα του αέρα και του νερού του περιβάλλοντος, και να διατηρεί τη φυτική, ζωική και ανθρώπινη υγεία’* (Doran and Parkin, 1994; Doran and Safley, 1997). Παρόλα αυτά, η γενική αντίληψη ενός υγιούς ή υψηλής ποιότητας εδάφους είναι μία αντίληψη που παρουσιάζει επαρκώς μόνο τις λειτουργίες οι οποίες είναι σημαντικές για τους ανθρώπους.

Οι (Karlen et al., 2003) επεσήμαναν πως η ποιότητα του εδάφους χρειάζεται να εκτιμηθεί σε σχέση με το λόγο για τον οποίο χρησιμοποιείται το έδαφος, καθώς ένα συγκεκριμένο έδαφος μπορεί να είναι υψηλής ποιότητας για μία λειτουργία, αλλά μπορεί να παρουσιάζει ανικανότητα για μία άλλη. Συγκεκριμένα, η καταλληλότητα του εδάφους για τη διατήρηση της ανάπτυξης των φυτών και της βιολογικής δραστηριότητας ορίζεται από τις φυσικές (πορώδες, ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό, δομή και όργωμα) και χημικές ιδιότητες (ικανότητα παροχής

θρεπτικών συστατικών, pH, περιεκτικότητα αλάτων), αρκετές από τις οποίες βασίζονται στην περιεκτικότητα σε SOM (Doran and Safley, 1997).

Ο όρος 'Οργανικό υλικό του εδάφους' (Soil Organic Matter, SOM) έχει χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς με διαφορετικούς τρόπους για να περιγράψει τα οργανικά συστατικά του εδάφους. Περιλαμβάνει τα στοιχεία C, H, O, N, P και S (Knull et al., 2004) και είναι ουσιαστικά μία μείξη βιογενετικών συστατικών (υπολείμματα φυτικά, μικροβιακά, και ζώων) στα διάφορα στάδια της αποδόμησης, μικροοργανισμών και μη αποδομήσιμου φυτικού υλικού (Arias et al., 2005). Οι ζωντανοί οργανισμοί του εδάφους και οι φυτικές ρίζες δε θεωρούνται SOM μέχρι να πεθάνουν και να αρχίσουν να αποσυντίθενται (Stamati, 2012). Ο Elliott το 1997 εισήγαγε την άποψη πως το SOM είναι ένας δείκτης κλειδί για την υγεία του εδάφους. Γενικά, αυξήσεις στο SOM φαίνονται να είναι επιθυμητές από αρκετούς αγρότες καθώς υψηλότερα επίπεδα παρατηρείται να είναι ευθέως συσχετιζόμενα με την καλύτερη διατροφή των φυτών, την ευκολία στην καλλιέργεια, την ευκολία στην προετοιμασία του εδάφους για σπορά, τη μεγαλύτερη σταθερότητα των συσσωματωμάτων, τη μειωμένη φαινομενική πυκνότητα, την αυξημένη ικανότητα συγκράτησης νερού, το ενισχυμένο πορώδες και τη γρηγορότερη θέρμανση του εδάφους κατά την άνοιξη (Lal, 2002).

Σύμφωνα με τον (Reeves, 1997) ο οργανικός άνθρακας του εδάφους (Soil Organic Carbon, SOC) είναι το πιο σταθερά αναφερόμενο χαρακτηριστικό σε μακροχρόνιες μελέτες για το έδαφος όπου θεωρείτε ο θεμέλιος λίθος για τους δείκτες ποιότητας καθώς είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τους φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς δείκτες ποιότητας του εδάφους.

2.1.3 ΑΠΕΙΛΕΣ

Η δομή του εδάφους έχει καθοριστικό ρόλο στην επιτέλεση των λειτουργιών του. Τυχόν βλάβη της δομής του συνεπιφέρει βλάβες σε άλλα μέσα και οικοσυστήματα του περιβάλλοντος (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006).

Ωστόσο, υπόκειται συχνά σε μία σειρά διεργασιών και απειλών υποβάθμισης, μεταξύ των οποίων είναι :

- ✓ η διάβρωση,
- ✓ η μείωση της οργανικής ύλης,
- ✓ η σημειακή και διάχυτη ρύπανση,
- ✓ η στεγανοποίηση,
- ✓ η συμπίεση,
- ✓ η μείωση της βιοποικιλότητας,
- ✓ η αύξηση της αλατότητας,
- ✓ οι πλημμύρες
- ✓ και οι κατολισθήσεις.

Συνδυασμός αυτών σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα μπορεί να καταλήξει ακόμη και στην ακραία περίπτωση της ερημοποίησης (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006).

Οι άνθρωποι στη διάρκεια της ιστορίας δεν έχουν καταφέρει να ενσωματωθούν στο οικοσύστημα του εδάφους, αλλά εξαρτώνται άμεσα από αυτό μέσω των υπηρεσιών που τους παρέχει για την επιβίωση τους (Nikolaïdis, 2011). Η ανθρώπινη δραστηριότητα επηρεάζει τις λειτουργίες του οικοσυστήματος του εδάφους με αποτέλεσμα σε πολλές περιπτώσεις να προκαλείτε η κατάρρευση του. Η κατανόηση της ποιότητας του εδάφους σημαίνει να κατανοούμε και να διαχειριζόμαστε το έδαφος κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να λειτουργεί βέλτιστα σήμερα αλλά και ταυτόχρονα να μην υπάρχει κίνδυνος να υποβαθμιστεί, ώστε να μην τίθεται σε κίνδυνο η μελλοντική του χρήση (Lewandowski et al., 1999).

Οι κυριότερες απειλές για το έδαφος από την ανθρωπογενή δραστηριότητα είναι (Banwart, 2011):

- η έκπλυση των θρεπτικών συστατικών του
- τοξικότητα από οξέα και μέταλλα
- η διάβρωση του εδάφους
- η συμπίεση του εδάφους
- η μείωση της βιοποικιλότητας λόγω των μονοκαλλιεργειών
- οι απώλειες σε οργανική ουσία λόγω της αύξησης των εκροών οργανικού άνθρακα
- η ρύπανση μέσω της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης

Οι μεταβολές στο οικοσύστημα του εδάφους που έχουν μακροχρόνιες συνέπειες τόσο στο τοπίο όσο και στη βιοτική και αβιοτική δομή του εδάφους, μπορεί να συμβούν λόγω (Nikolaidis, 2011):

- ❖ των κλιματικών αλλαγών,
- ❖ των αλλαγών στις χρήσεις γης,
- ❖ τη μετατροπή γης με φυσική βλάστηση σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις,
- ❖ τη λίπανση,
- ❖ τη μείωση της υπέργειας βιοποικιλότητας λόγω των καλλιεργητικών πρακτικών,
- ❖ και από την υπερβόσκηση.

2.2 ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΥΛΗ ΣΤΑ ΕΔΑΦΗ

2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ






Το σύνολο σχεδόν του άνθρακα εισέρχεται στο βιοτικό τμήμα των οικοσυστημάτων μέσω της άμεσης πρόσληψης διοξειδίου του άνθρακα από τα φυτά. Το διοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται και χρησιμοποιείται από τα φυτά για την παρασκευή διάφορων χημικών ενώσεων που τις χρησιμοποιούν είτε σαν δομικά συστατικά ή τις χρησιμοποιούν για την αναπνοή και το διοξείδιο του άνθρακα που περιέχουν απελευθερώνετε πάλι πίσω στην ατμόσφαιρα. Οι ενώσεις που συναντώνται στους ιστούς των φυτών κυρίως είναι η κυτταρίνη (35-45%), η λιγνίνη, η ημικυτταρίνη, τα λιπίδια οι πρωτεΐνες, τα σάκχαρα και το άμυλο. Η μισή περίπου ποσότητα του άνθρακα που έχει αφομοιωθεί από τα φυτά καταλήγει τελικά στο έδαφος με τη μορφή αποσυντιθέμενης οργανικής ύλης. Η αποδόμηση των υπολειμμάτων είναι η κύρια δίοδος της απελευθέρωσης άνθρακα στα εδάφη. Αν και το 55-75% του C των φυτικών υπολειμμάτων ελευθερώνετε στην ατμόσφαιρα ως CO₂ μετά από ένα χρόνο.

Η Οργανική Ύλη του εδάφους που βρίσκεται στα επιφανειακά στρώματα του εδάφους υποβάλλεται σε συνεχείς διεργασίες αποσύνθεσης και σύνθεσης νέων ουσιών, ονομάζεται αλλιώς και χούμος, δημιουργείται από τα φυτικά υπολείμματα φύλλα, κλαδιά, ρίζες καθώς και από τα εκκρίματα και υπολείμματα των ζωικών οργανισμών, η αποσύνθεση των υπολειμμάτων αυτών γίνεται μέσω διάφορων μικροοργανισμών και βακτηρίων που βρίσκονται στο έδαφος. Ο χούμος αποτελεί συνήθως ένα λεπτό μαύρο στρώμα με κολλοειδή υφή. Το οργανικό υλικό του εδάφους, αν και βρίσκεται σε μικρές ποσότητες στα εδάφη, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις λειτουργικές διεργασίες του εδάφους (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2002) και στις ιδιότητές του: βιολογικές (πηγή θρεπτικών για τα φυτά, υπόστρωμα για την μικροβιακή δραστηριότητα), χημικές (ρύθμιση και αλλαγές του pH), και φυσικές (σταθεροποίηση της δομής του εδάφους), ενώ αποτελεί δρώσα δύναμη για την αποσάθρωση των ορυκτών (παραγωγή μικρο-

θρεπτικών) και περιβαλλοντικό ρυθμιστή, πρώτον γιατί προστατεύει τις λεκάνες απορροής και τα υπόγεια νερά από τα γεωργικά χημικά και τα δημοτικά απόβλητα, και δεύτερον γιατί συσσωρεύει τον άνθρακα ο οποίος θα μπορούσε διαφορετικά να συμβάλει στην αύξηση των αερίων θερμοκηπίου (CO₂) και στην αλλαγή επομένως του κλίματος της γης (Stamati, 2012). Συνολικά, στα εδάφη συγκρατείται πάνω από δύο φορές περισσότερος άνθρακας από ότι στη βλάστηση και την ατμόσφαιρα (Stamati, 2012). Η ποσότητα του άνθρακα που δεσμεύεται ετησίως στα εδάφη ισοδυναμεί με το 1/4 σε σύγκριση με τους 8 Gt άνθρακα που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες- αναδεικνύοντας τη σημασία του SOM (Soil Organic Matter) σε σχέση με τις κλιματικές αλλαγές (Lal, 2004).

2.2.2 ΑΠΟΔΟΜΗΣΗ ΟΡΓΑΝΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού υλικού (δηλαδή η λιγνίνη, η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη, τα λιπίδια και οι πρωτεΐνες) μπορεί να αποδομηθεί πλήρως αν και κάποιες ποσότητες οργανικού υλικού μπορεί να χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να αποδομηθούν από ότι άλλες (όπως το ξύλο σε σχέση με τα φύλλα) (Stockmann et al., 2011). Η αποδόμηση των υπολειμμάτων είναι η κύρια δίοδος της απελευθέρωσης άνθρακα στα εδάφη (Stockmann et al., 2011). Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό της αποδόμησης είναι :

-  το κλίμα,
-  η υγρασία,
-  η θερμοκρασία,
-  η ποιότητα των υπολειμμάτων,
-  και η σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας στο έδαφος

(Meentemeyer, 1978; Melillo et al., 1982; Parton et al., 2007)

Η εισαγωγή υπολειμμάτων είναι εκείνη που παρέχει την πηγή άνθρακα για τη μικροβιακή ανάπτυξη και δραστηριότητα, πράγμα που σημαίνει όσο υψηλότερη είναι η ποιότητα (δηλαδή πιο εύκολα αποδομήσιμο) τόσο πιο γρήγορα μπορεί να

μεγαλώσει η μικροβιακή κοινότητα (Agren and Bosatta, 1996). Ωστόσο, χαρακτηριστικά του αποδομήσιμου υλικού, όπως ο λόγος C:N και η περιεκτικότητα σε λιγνίνη, είναι κρίσιμα για να καθορίσουν πόσο γρήγορα θα έχουμε παραγωγή των προϊόντων αποδόμησης (Meentemeyer, 1978; Melillo et al., 1982) και γενικά, η αποδόμηση των υπολειμμάτων είναι αρνητικά συσχετισμένη με το λόγο C:N του υλικού, την περιεκτικότητα σε λιγνίνη και το λόγο λιγνίνη:N, και θετικά συσχετισμένη με τις συγκεντρώσεις N (Melillo et al., 1982, 1989). Τέλος, μελέτες έχουν δείξει πως ο βαθμός αποδόμησης αυξάνεται με τη μείωση του μεγέθους των συσσωματωμάτων (von Lützow et al., 2007).

2.2.3 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΟΥ ΜΕΤΕΧΕΙ Η ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΥΛΗ

Δυο είναι οι κύριες διεργασίες στις οποίες μετέχει η Οργανική Ύλη :

- Η διάσπαση της αρχικής οργανικής ουσίας σε ανόργανα συστατικά (ορυκτογένεση),
- Και η σύνθεση νέων πολύπλοκων οργανικών ενώσεων (χουμοποίηση).

Η Οργανική Ύλη του εδάφους συσσωρεύεται στο έδαφος ανάλογα με τον τύπο του εδάφους, τη βλάστηση, το κλίμα και το σύστημα διαχείρισης των καλλιεργειών. Η περιεκτικότητα της μεταβάλετε από έδαφος σε έδαφος από περιοχή σε περιοχή και μπορεί να κυμαίνεται από 0,80% έως 98,0%. Εδάφη με οργανική ουσία <20% χαρακτηρίζονται ως ανόργανα ενώ με περιεκτικότητα από 20% έως 80% θεωρούνται ως οργανικά (Κουκουλάκης et al., 2000).

Σύμφωνα με το FAO (Bot and Benites, 2005) μερικές από τις πιο σημαντικές λειτουργίες της οργανικής ύλης του εδάφους είναι ότι :

1. συμβάλλει στην αύξηση της γονιμότητας του εδάφους, καθώς συγκρατεί τα κατιόντα και τα θρεπτικά συστατικά σε οργανικές μορφές στο έδαφος με αποτέλεσμα οι απαραίτητες θρεπτικές ουσίες για την ανάπτυξη των φυτών να απελευθερώνονται σταδιακά.

2. δεσμεύει τα σωματίδια του εδάφους μαζί με αποτέλεσμα τη δημιουργία συσσωματωμάτων που βελτιώνουν την δομή του εδάφους και τον αερισμό του
3. λειτουργεί ως ένα σφουγγάρι στο έδαφος, διατηρώντας την υγρασία του εδάφους, τα εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη μπορούν να συγκρατήσουν περισσότερο νερό από ό,τι εκείνα με χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη.
4. παρέχει τροφή για τους μικροοργανισμούς που ζουν στο έδαφος.

Η συσσωμάτωση των σωματιδίων είναι αυτή που παρέχει τη δομή στα εδάφη (μέγεθος και σταθερότητα των συσσωματωμάτων) και γι αυτό έχει συσχετισθεί με τη γονιμότητα του εδάφους (Stamati et al., 2013b). Για παράδειγμα, αγρονομικά πολύτιμο έδαφος είναι το έδαφος στο οποίο μεγαλύτερο από το 60% των συσσωματωμάτων του βρίσκεται σε μία κλίμακα μεταξύ των 0,25 και 10 mm (Banwart, 2011).

Η δημιουργία συσσωματωμάτων παρέχει μια φυσική ασπίδα προστασίας του οργανικού άνθρακα από τους διάφορους παράγοντες που συντελούν στη διάσπαση και αποικοδόμηση του. Τα συσσωματώματα που παραμένουν σταθερά κατά τη διέλευση του νερού (water stable aggregates, WSA) έχουν αναγνωριστεί ως ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της ποιότητας του εδάφους και είναι ευαίσθητα στις αγροτικές πρακτικές, σχετίζονται δε άμεσα με τη διάβρωση του εδάφους, τη δυναμική του άνθρακα και τη μεταφορά των χημικών στοιχείων (Stamati, 2012).

2.3 ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΥΛΗΣ ΣΤΑ ΕΔΑΦΗ

Η οργανική ύλη στα εδάφη σταθεροποιείται με τους παρακάτω μηχανισμούς:

1) Τη σταθεροποίηση από τις αλληλεπιδράσεις των οργανικών με τα ορυκτά του εδάφους. Ποσότητα του οργανικού υλικού, δηλαδή τα αποσυνθεμένα κατάλοιπα ή/και απομεινάρια των μικροβίων και μυκήτων, δεσμεύονται από τα ορυκτά (Stockmann et al., 2011), προσδένονται δηλαδή στην επιφάνεια των ορυκτών με γέφυρες κατιόντων, δεσμούς υδρογόνου και van der Waals δυνάμεις (Kleber et al., 2007). Ένας αριθμός παραγόντων όπως το pH, οι συνθήκες οξειδοαναγωγής και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των ορυκτών και του οργανικού υλικού επηρεάζουν το βαθμό ρόφησης και τη δημιουργία συμπλόκων στις επιφάνειες των οργανικών και των ορυκτών. Σε άλλη περίπτωση, αυτό που συμβαίνει είναι ότι το οργανικό υλικό εγκλωβίζεται σε μικρά συσσωματώματα (κροκίδωση αργίλου στα μικρο-συσσωματώματα) τα οποία συνδέονται με την ιλύ και την άργιλο.

Η πιο περιεκτική εννοιολογική προσέγγιση της αλληλεπίδρασης των οργανικών και των ορυκτών στα εδάφη είναι το μοντέλο τριών στοιβάδων (κινητική ζώνη, υδροφοβική ζώνη, και ζώνη επαφής) (Kleber et al., 2007). Ένας λοιπόν πολύ σημαντικός παράγοντας για την προστασία του άνθρακα είναι η παρουσία αργίλου και οξειδίων, καθώς τα οργανικά και οι οργανο-ορυκτές ποσότητες απορροφώνται στις επιφάνειές τους (Stamati, 2012). Πιο συγκεκριμένα, οι αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες των αργιλικών ορυκτών προσδένονται με τις αρνητικά φορτισμένες ποσότητες με γέφυρες κατιόντων (Jastrow et al., 2007). Έτσι, η διαθεσιμότητα πολλαπλών κατιόντων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό συμπλόκων αργίλου, κατιόντων και οργανικών (Stamati, 2012). Παρομοίως, η διαθεσιμότητα οξειδίων σιδήρου και αλουμινίου είναι αυτή που καθορίζει την πρόσδεση στην επιφάνειά τους οργανικής ποσότητας μέσω ηλεκτροστατικών δυνάμεων (Stamati, 2012).

2) Τη φυσική προστασία εν μέσω της ενθυλάκωσης οργανικών στις δομές των συσσωματωμάτων (WSA), μάκρο και μικρο-συσσωματωμάτων, του βιοτικού δηλαδή αποκλεισμού, ο οποίος φαίνεται να είναι και ο κύριος μηχανισμός σταθεροποίησης του SOM στα εδάφη με μικρή περιεκτικότητα σε άργιλο (Six et al., 2002a, 2002b). Τα μικρο και μάκρο συσσωματώματα παρέχουν μία φυσική προστασία από τη δραστηριότητα της αποδόμησης του οργανικού υλικού του εδάφους και του αζώτου που είναι ενσωματωμένα στα συσσωματώματα και επηρεάζουν επομένως τον κύκλο του άνθρακα και του αζώτου στα εδάφη (Stamati, 2012). Η μειωμένη αυτή δραστηριότητα της αποδόμησης στις δομές των συσσωματωμάτων οφείλεται στην έλλειψη οξυγόνου, στη μη διαθεσιμότητα νερού και στη μη προσβασιμότητα ενζύμων (Jastrow et al., 2007), εφόσον θεωρείται ότι τα βακτήρια, τα πρωτόζωα και τα νηματοειδή μπορούν να περάσουν από πόρους μεγαλύτερους από 3μm, 5μm και 30μm αντίστοιχα.

Η σταθεροποίηση της οργανικής ύλης στα εδάφη (SOM) ελέγχει την μικροβιακή κοινότητα, την γονιμότητα και την δομή (π.χ. μέγεθος και σταθερότητα των συσσωματωμάτων) του εδάφους, η οποία εν τέλει επηρεάζει τον ρυθμό διήθησης, την υγρασία, την διάχυση του οξυγόνου, την απορροή και την διάβρωση (Arias et al., 2005; Six et al., 2004).

2.3.1 ΤΡΟΠΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ

Τα συσσωματώματα του εδάφους είναι η βασική δομική μονάδα του εδάφους. Οι δομές αυτές αποτελούνται από συνενωμένους κόκκους εδάφους (άμμος, άργιλο και ιλύς) που συγκρατούνται μεταξύ τους από ενυδατωμένα ορυκτά της αργίλου, οργανικό υλικό, οργανικές ενώσεις, μύκητες και βακτήρια καθώς και από υφές μυκήτων. 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. Η οργανική ύλη του εδάφους είναι αυτή που έχει σχετιστεί περισσότερο με το σχηματισμό συσσωματωμάτων. Τα συσσωματώματα παρέχουν μια φυσική

προστασία από τις διαδικασίες αποσύνθεσης τις οργανικής ύλης του εδάφους και του αζώτου ενσωματώνοντάς τα μέσα τους με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τους κύκλους επαναφοράς του άνθρακα και του αζώτου στο έδαφος.

2.3.1.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Πολλοί παράγοντες παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό και τη σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων στο έδαφος, όπως:

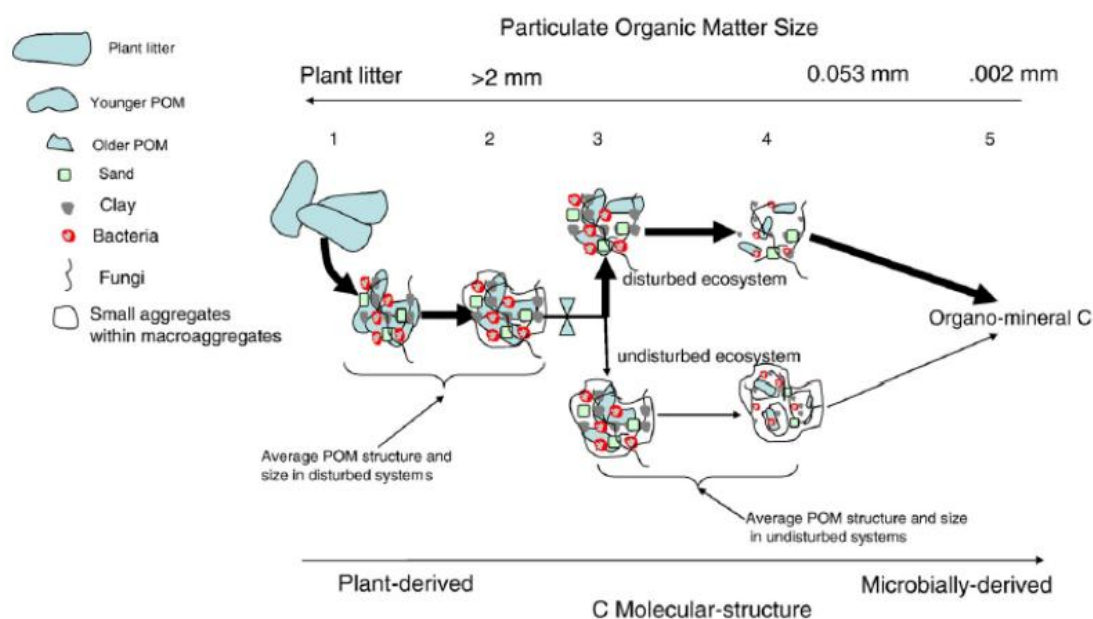
- τα αρχικά σωματίδια (ιλύς-άργιλος-άμμος) και η φόρτιση των επιφανειών τους,
- η οργανική ύλη που είναι διαθέσιμη για αποσύνθεση (με υδρόφοβο χαρακτήρα, που προσκολλάτε στις επιφάνειες),
- τα βακτήρια τα οποία χρησιμοποιούν την οργανική ύλη και παράγουν εκκρίματα τα οποία καταλύουν τη διάσπαση και τη 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).

2.3.1.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Έχουν αναγνωριστεί δύο βασικά εννοιολογικά μοντέλα σχετικά με τον σχηματισμό των συσσωματωμάτων (Nikolaidis and Bidoglio, 2013; Plante and McGill, 2002):

- i) το ιεραρχικό μοντέλο που προτείνει το σχηματισμό των μικρο-συσσωματωμάτων και εν συνεχεία τον σχηματισμό των μακρο-συσσωματωμάτων από τον συνδυασμό των μικρο-συσσωματωμάτων,
- ii) και το μοντέλο που προτείνει ότι πρωτίστως 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 (Εικόνα 2-2 & Εικόνα 2-3)



Εικόνα 2-1Κύκλος των μακρο-συσσωματωμάτων: διεργασία σχηματισμού και καταστροφής τους (Grandy and Neff, 2008)

Οι Tisdall and Oades (1982) στην προσπάθειά τους να κατανοήσουν τη συσχέτιση μεταξύ της βιολογικής δραστηριότητας του εδάφους, της αποσύνθεσης της σταθεροποίησης της οργανικής ύλης στο έδαφος (SOM), και τη δυναμική των συσσωματωμάτων όρισαν τη διαφορά μεταξύ μικρο και μακρο-συσσωματωμάτων ως μικρότερης και μεγαλύτερης αντίστοιχα διαμέτρου των 250 μm αναφέρουν επίσης ότι οι οργανικοί δεσμευτικοί παράγοντες στο έδαφος ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες(Tisdall and Oades, 1982):

1. μεταβατικούς-παροδικούς: πολυσακχαρίτες που αποικοδομούνται ταχέως από τους μικροοργανισμούς
2. προσωρινούς: ρίζες και υφές μυκήτων
3. επίμονους: ανθεκτικές αρωματικές ενώσεις που συνδέονται με πολυκατιόντα μέταλλων και δυνατά προσροφημένα πολυμερή

Και προτείνουν το σχηματισμό των μικρο-συσσωματωμάτων και εν συνεχεία τον σχηματισμό τον μακρο-συσσωματωμάτων με τα μικρο-συσσωματώματα να λειτουργούν σαν δομικές μονάδες.

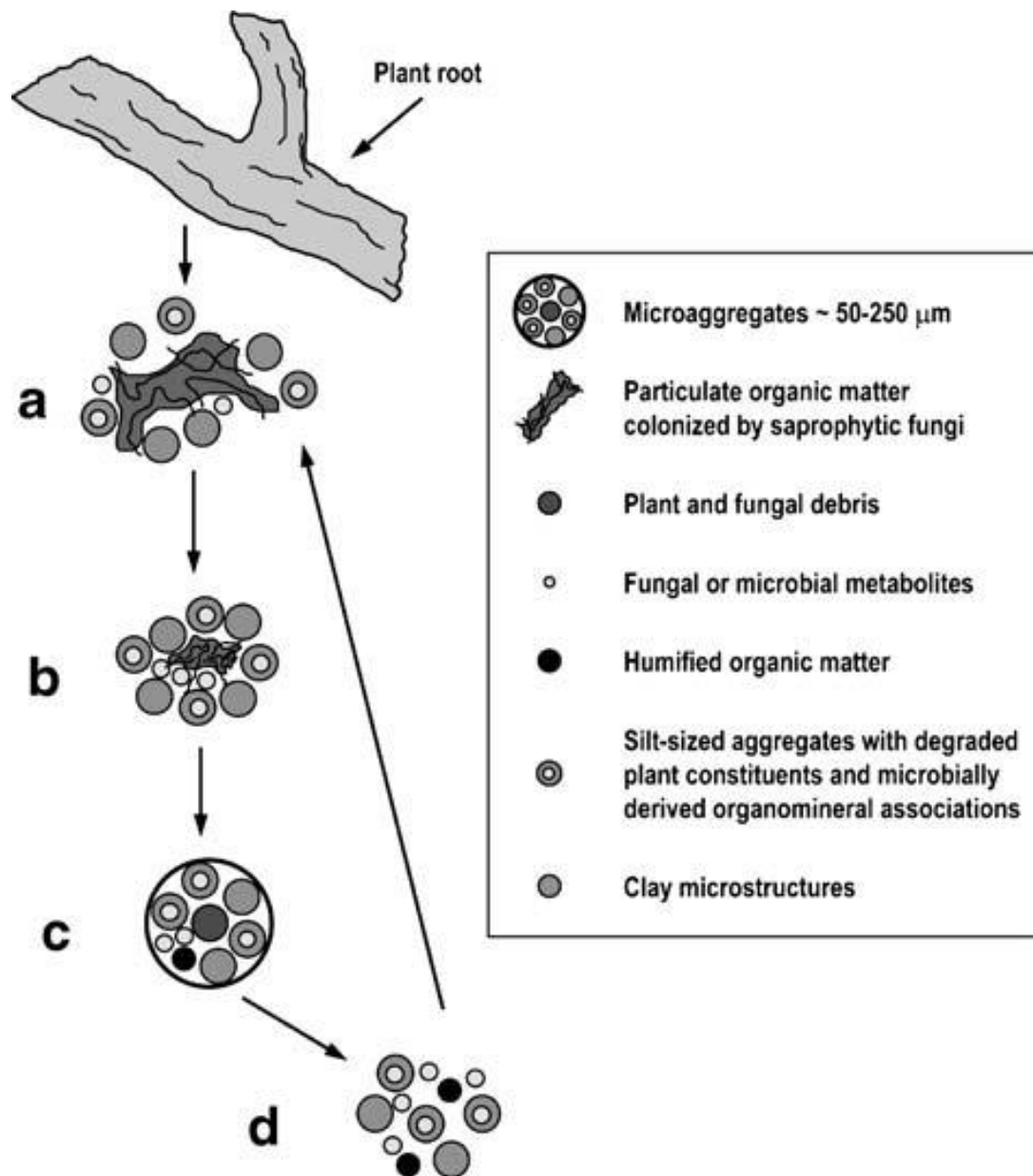
Το ο Oades (Oades, 1984) τροποποιεί αυτή την ιδέα και προτείνει ένα άλλο θεωρητικό μοντέλο κατά το οποίο οι ρίζες και οι υφές καθώς αποσυντίθενται δημιουργούν θραύσματα τα οποία γίνονται ο πυρήνας των μακρο-συσσωματωμάτων εντός των οποίων σχηματίζονται τα μικρο-συσσωματώματα. Καθώς οι ρίζες και οι υφές αποσυντίθενται καλύπτονται με βλεννώδες υλικό που παράγεται από τους διάφορους μικρό-οργανισμούς κατά την αποσύνθεση εκεί προσκολλώνται τα ορυκτά της αργίλου με αποτέλεσμα την επικάλυψη του οργανικού θραύσματος με συνέπεια την καθυστέρηση στην αποδόμηση της οργανικής ύλης. Το τελικό προϊόν αυτής της διαδικασίας είναι τα μικρο-συσσωματώματα δεσμευμένα σε ένα διάλυμα από χουμικές ενώσεις και βλέννα.

Σε συμφωνία με τα παραπάνω οι Nikolaidis και Bidoglio το 2011 αναφέρουν ότι για την εξήγηση του μηχανισμού σύμφωνα με τον οποίο σχηματίζονται τα συσσωματώματα υπάρχουν δύο βασικά θεωρητικά μοντέλα προσέγγισης. Η πρώτη προσέγγιση προτείνει ένα μηχανισμό κατά τον οποίο τα μικρο-συσσωματώματα ($WSA < 250 \mu m$) που αποτελούνται από οργανικά μόρια συνδεδεμένα με αργιλικά ορυκτά και πολυσθενή κατιόντα σχηματίζουν οργανο-μεταλλικά σύμπλοκα, τα οποία στη συνέχεια συνενώνονται για να σχηματίσουν τα μακρο-συσσωματώματα (Nikolaidis and Bidoglio, 2013).

Σύμφωνα με το δεύτερο μηχανισμό τα μακρο-συσσωματώματα σχηματίζονται γύρω από τα σωματιδιακό οργανικό υλικό (Particulate Organic Matter, POM). Καθώς τα σωματίδια της οργανικής ύλης (POM) αποσυντίθεται οι βακτηριακές αποικίες δεσμεύουν τα σωματίδια της αργίλου με τα εκκρίματα 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. Το δεύτερο θεωρητικό μοντέλο για το σχηματισμό των συσσωματωμάτων προτείνεται από τους περισσότερους μελετητές σήμερα (Balesdent et al., 2000; Bronick and Lal, 2005; Golchin et al., 1994; Grandy and Neff, 2008; Helfrich et al., 2008; Nikolaidis and Bidoglio, 2013; Plante and McGill, 2002; Puget et al., 2000; Six et al., 2002b, 2004, 2002a; Stamati, 2012)

Οι Jastrow et al, το 2007 παρουσιάζουν μια σχηματική απεικόνιση για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου σχηματισμού των συσσωματωμάτων (Εικόνα 2-2). Αρχικά τα θραύσματα και τα αποσυντιθέμενα φυτικά και ριζικά υπολείμματα επιστρώνονται με τα σωματίδια των ορυκτών και σχηματίζουν τα μικρο-συσσωματώματα η διαδικασία της αποσύνθεσης συνεχίζεται, αλλά με βραδύτερο ρυθμό λόγω της φυσικής προστασίας που τους παρέχεται και τα μικρο-συσσωματώματα σταθεροποιούνται με την καθυστέρηση της αποσύνθεσης και με την πολύ στενή επαφή των ορυκτών του εδάφους εντός των σταθερών μικρο-συσσωματωμάτων παρέχει στην οργανική ύλη τόσο χημική προστασία όσο και προστασία από την υγρασία και το νερό μέσω των δεσμών που αναπτύσσονται με το ορυκτό κλάσμα στη συνέχεια όταν οι οργανικές συνδετικές ουσίες αποσυντεθούν επαρκώς τα συσσωματώματα αποσταθεροποιούνται και το ορυκτό κλάσμα εμπλουτίζεται με νέες οργανο-μεταλλικές ενώσεις και γίνεται διαθέσιμο για να ενσωματωθεί σε νέα μικρο-συσσωματώματα.



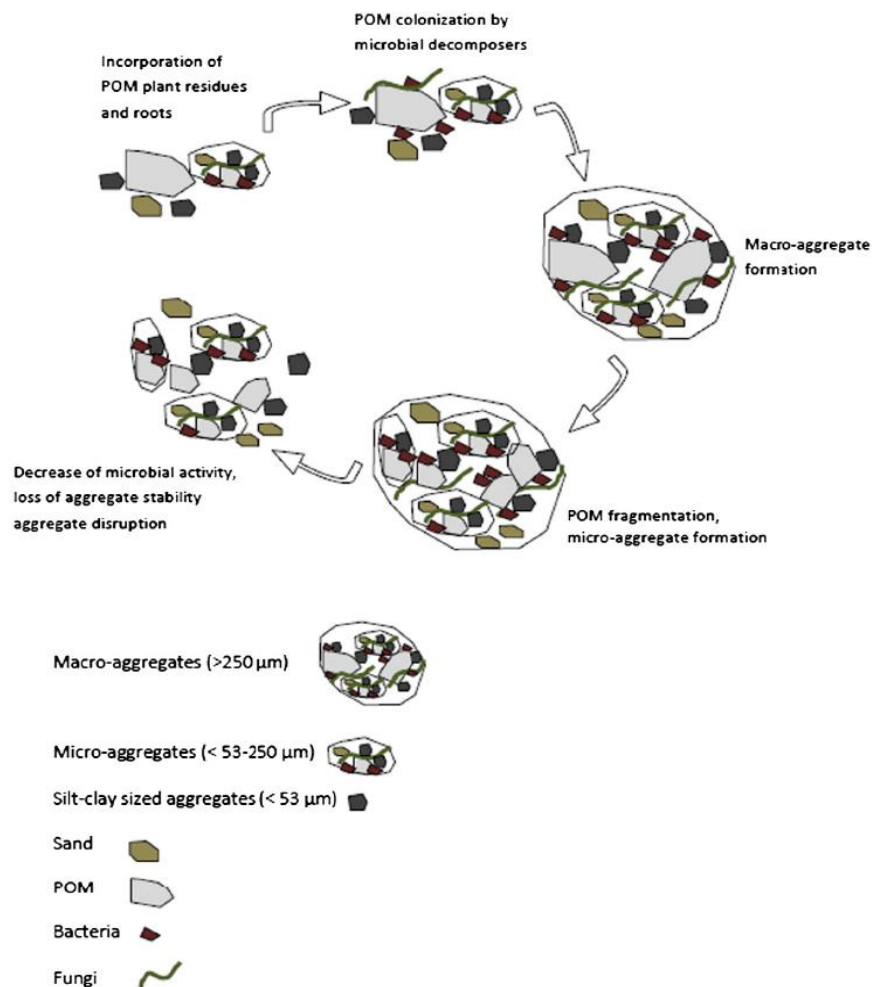
Εικόνα 2-2 Τρόπος σχηματισμού συσσωματωμάτων (Jastrow, 2007).

Τα καινούργια φυτικά υπολείμματα συντελούν στο σχηματισμό των μακρο-συσσωματωμάτων καθώς είναι πηγή άνθρακα για μικροβιακή δραστηριότητα και κατά συνέπεια συντελούν στην παραγωγή συνδετικού υλικού που παράγεται λόγω αυτής της μικροβιακής δραστηριότητας.

2.3.1.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΥ

Αναλυτικότερα τα βήματα στη διαδικασία σχηματισμού των συσσωματωμάτων είναι τα εξής (Stamati, 2012):

1. Τα μακρο-συσσωματώματα σχηματίζονται γύρω από τα φρέσκα φυτικά υπολείμματα τα οποία στη συνέχεια γίνονται χοντρό σωματιδιακό οργανικό υλικό εντός των συσσωματωμάτων (intra-aggregate particulate organic matter, iPOM).
2. Στη συνέχεια το λεπτό (iPOM) σχηματίζεται από την αποσύνθεση και την επακόλουθη διάσπαση του χοντρού (iPOM) εντός του συσσωματώματος.
3. Το λεπτό (iPOM) σταδιακά επιστρώνεται από τα αργιλικά ορυκτά και τα παράγωγα της μικροβιακής δραστηριότητας για να σχηματιστούν τα μικρο-συσσωματώματα εντός των μακρο-συσσωματωμάτων.
4. Οι συνδετικές ουσίες μέσα στα μακρό-συσσωματώματα σπάνε με αποτέλεσμα να χάνετε η σταθερότητα των μακρό-συσσωματωμάτων αλλά ταυτόχρονα να ελευθερώνονται σταθερά μικρό-συσσωματώματα, που είναι οι δομικές μονάδες για τον επόμενο κύκλο.



Εικόνα 2-3 Διαδικασία σχηματισμού των συσσωματωμάτων (Stamati et al., 2013b)

2.3.2 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ

Όσο πιο αργή είναι η διαδικασία του κύκλου των συσσωματωμάτων τόσο υψηλότερο είναι το επίπεδο προστασίας της οργανικής ύλης .

Στα αγρό-οικοσυστήματα τα μάκρο-συσσωματώματα παρουσιάζουν μεγάλη εποχιακή διακύμανση (Six et al., 2004). Σε ένα γρήγορο κύκλο ζωής τα μάκρο-συσσωματώματα παρέχουν άμεση προστασία στη νέο εισαχθείσα οργανική ύλη και επιτρέπουν την μεταφορά αζώτου και άνθρακα στα μικρο-συσσωματώματα, όπου εκεί πιθανόν να σταθεροποιηθούν μετά τη θραύση των μάκρο-συσσωματωμάτων (Helfrich et al., 2008). Ο Jastrow βρήκε ότι η συσσωρευμένη οργανική ύλη στα μάκρο-συσσωματώματα ήταν σχετικά φρέσκια αλλά λιγότερο από το 20% του

συσσωρευμένου άνθρακα συναντάται στη μορφή της σωματιδιακής οργανικής ύλης (Jastrow, 1996). Η μεγαλύτερη ποσότητα συσσωρευμένου άνθρακα συναντάται στο κλάσμα ιλύς-αργίλου των μακρο-συσσωματωμάτων. Έχει επίσης παρατηρηθεί ένα κατώτατο όριο περιεκτικότητας οργανικού άνθρακα για τον σχηματισμό συσσωματωμάτων (Jastrow, 1996; Krull et al., 2004).

2.3.3 ΣΧΕΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ, ΟΡΓΑΝΙΣΜΩΝ & ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΥΛΗΣ

Ο Six το 2004 αναφέρει ότι σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην κατανόηση των σχέσεων μεταξύ συσσωματωμάτων, ζωντανών οργανισμών του εδάφους και οργανικής ύλης, και υπάρχει μια συνεχιζόμενη εξέλιξη όσο αφορά τα θεωρητικά μοντέλα για την περιγραφή αυτών των σχέσεων (Six et al., 2004). Οι σημαντικότερες έννοιες για την κατανόηση αυτών των σχέσεων είναι:

1. Υπάρχει ιεραρχική σειρά στα συσσωματώματα που υπάρχουν στο έδαφος με την Οργανική Ύλη του Εδάφους, SOM να είναι ο σημαντικότερος συνδετικός παράγοντας του εδάφους
2. τα μικρο-συσσωματώματα σχηματίζονται εντός των μακρο-συσσωματωμάτων
3. το σωματιδιακό οργανικό υλικό (particulate organic matter, POM) που προέρχεται από ριζικό σύστημα των φυτών από διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην δυναμική των συσσωματωμάτων
4. η δραστηριότητα των γαιοσκωλήκων έχει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των μικρο- και μακρο-συσσωματωμάτων
5. η Οργανική Ύλη του Εδάφους, SOM πρωτίστως σταθεροποιείται σε σταθερά μακρο-συσσωματώματα
6. μεταβολές στο ρυθμό του κύκλου ζωής των συσσωματωμάτων επηρεάζουν την σταθεροποίηση της οργανικής ύλης σε όλους τους τύπους εδαφών.

2.3.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΣΗ ΣΤΑ ΕΔΑΦΗ

Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων και ο κύκλος ζωής τους κυρίως εξαρτάται από την ποσότητα και τη χημική σύσταση της οργανικής ουσίας και του φυτικού υλικού που εισέρχεται στο έδαφος, το pH και την αγωγιμότητα, την περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα, άζωτο, και ανθρακικά, την ιοντο-ανταλλακτική ικανότητα του εδάφους, τα οξείδια του σιδήρου, την περιεκτικότητα σε άργιλο και τον τύπο των αργίλων, τη μικροχλωρίδα (π.χ. γαιοσκώληκες), τις ρίζες, ριζικά τριχίδια και μυκόρριζα, τους μύκητες, τη μικροβιακή δραστηριότητα, τις κλιματικές συνθήκες, τις καλλιεργητικές πρακτικές: είδος καλλιέργειας, τύπος οργώματος, διαχείριση των φυτικών υπολειμμάτων, εφαρμογή εδαφοβελτιωτικών, λιπάσματα, άρδευση.

2.3.4.1 ΟΡΓΑΝΙΚΗ ΥΛΗ

Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων και ο κύκλος ζωής τους κυρίως εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα των φυτικών υπολειμμάτων και τις διάφορες άλλες μορφές της οργανικής ουσίας που εισέρχονται στο έδαφος (Abiven et al., 2009, 2007). Αφού η οργανική ύλη του εδάφους είναι το κέντρο σχηματισμού των σταθερών εδαφικών μακρο-συσσωματωμάτων έχει βρεθεί μια δυνατή θετική συσχέτιση μεταξύ της σταθερότητας των συσσωματωμάτων από πλευράς της μέσης διαμέτρου MWD (mm) και της ποσοστιαίας περιεκτικότητας (%) του εδάφους σε οργανική ύλη. Μια τέτοια συσχέτιση είναι σημαντική για εδάφη που είναι παρόμοιας ορυκτολογικής σύστασης και υφής (Boix-Fayos et al., 2001). Παράλληλα μελέτες σχετικά με τη σύνθεση της οργανικής ύλης του εδάφους έδειξαν ότι η αναλογία C/N μειώνεται καθώς μειώνεται το μέγεθος των συσσωματωμάτων (Angers and Carter, 1996; Elliott, 1986; Gupta and Germida, 1988).

2.3.4.2 ΑΝΟΡΓΑΝΟΙ ΣΥΝΔΕΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ

Τα οξείδια έχουν αναγνωριστεί ότι είναι πολύ σημαντικά όσον αφορά τη συσσωμάτωση και τη σταθεροποίηση της οργανικής ύλης του εδάφους όντας ο κυρίαρχος παράγοντας δέσμευσης (συνδεδετική ύλη) σε τροπικά εδάφη (Six et al.,

2004). Οι επιδράσεις των οξειδίων και του ασβεστίου σχετίζονται κυρίως με το επίπεδο των μικρο-συσσωματωμάτων αλλά και στις δύο περιπτώσεις επίσης συνδέετε και με τα μακρο-συσσωματώματα μέσω της διέγερσης της μικροβιακής δραστηριότητας σε όξινα εδάφη στην περίπτωση του ασβεστίου. Η σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων και της οργανικής ύλης του εδάφους επηρεάζεται με τρεις τρόπους από τα οξείδια.

1. Η οργανική ουσία προσροφάτε στις επιφάνειες των οξειδίων
2. Ένας ηλεκτροστατικός δεσμός δημιουργείτε μεταξύ των θετικά φορτισμένων οξειδίων και των αρνητικά φορτισμένων ορυκτών της αργίλου
3. Ένα κάλυμμα από οξείδια στην επιφάνεια των ορυκτών δημιουργεί συνδετικές γέφυρες μεταξύ πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων.

Η τελευταία διαδικασία αναφέρετε σαν αυτή που σχετίζεται περισσότερο με τη μεγαλύτερη σταθερότητα των μακρο-συσσωματωμάτων σε εδάφη oxisols (πλούσια σε οξείδια) συγκρινόμενα με εδάφη με χαμηλά επίπεδα οξειδίων (Six et al., 2004).

Άλλος ένας παράγοντας που έχει σχετιστεί με τη συσσωμάτωση είναι η περιεκτικότητα σε άργιλο. Οι Douglas and Goss, 1982 αναφέρουν ότι αυξημένη περιεκτικότητα σε άργιλο χρειάζεται υψηλότερα ποσοστά οργανικής ουσίας προκειμένου να διατηρηθεί η σταθερότητα των συσσωματωμάτων (Douglas and Goss, 1982). Οι Virto et al το 2008 στην προσπάθεια τους να αποσαφηνίσουν την επίδραση της ορυκτολογικής σύστασης του εδάφους και της περιεκτικότητας σε άργιλο στη συσσωμάτωση απέδειξαν ότι η μη συσσωματωμένη άργιλος ήταν λιγότερο εμπλουτισμένη σε οργανικό άνθρακα συγκριτικά με την απομονωμένη άργιλο εντός των συσσωματωμάτων (Virto et al., 2008). Αυτό υποστηρίζει την ιδέα ότι η αναλογία 2:1 αργίλου είναι σε θέση να αποθηκεύει περισσότερη οργανική ουσία σχηματίζοντας σταθερά μικρο-συσσωματώματα στο κλάσμα ιλύος ενώ χαλαζίες και καολινίτες βρίσκονταν κυρίως στο κλάσμα της αργίλου που δεν είχε

σχηματιστεί σε συσσωματώματα. Οι (Fernandez-Ugalde et al., 2012) διαπιστώνουν ότι τα μικρο-συσσωματώματα έχουν τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άργιλο με προτίμηση τη συσσώρευση στη σμεκτική φάση, φάση κατά την οποία τα αργιλικά ορυκτά διογκώνονται όταν έρχονται σε επαφή με το νερό και εμφανίζουν υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων . Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι αυτή η φάση (σμεκτική) συνέβαλε ιδιαίτερα στη δυναμική των μικρο-συσσωματωμάτων. Ενώ η συμβολή της ήταν μικρότερη στα μακρο-συσσωματώματα όπου η οργανική ύλη είναι κυρίαρχη .

2.3.4.3 ΡΙΖΕΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ

Οι ρίζες εκκρίνουν ένα γλοιώδης υλικό από πολυσακχαρίτες και διάφορες άλλες ενώσεις που μπορεί να λειτουργεί ως δεσμευτικός και συγκολλητικός παράγοντας, στη συσσωμάτωση του εδάφους (Oades, 1978). Σύμφωνα με τους Six et al, 2004 οι ρίζες των φυτών επηρεάζουν την εν γένει δομή του εδάφους μπορούν να ομαδοποιηθούν σε πέντε κατηγορίες (Six et al., 2004):

1. μέσω της διείσδυσης των ριζών στο έδαφος
2. αλλάζοντας το καθεστώς της εδαφικής υγρασίας
3. με τις εκκρίσεις των ριζών
4. με την αποσύνθεση των νεκρών ριζών
5. μέσω της περιπλοκής των ριζών με τα σωματίδια του εδάφους

Ο βαθμός της επιρροής των ριζών στη δομή του εδάφους μέσω των εξιδρώσεων των ριζών είναι πολύ μεταβλητός, καθώς η παραγωγή και η σύνθεση των βλεννωδών εκκρίσεων εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως το καθεστώς του νερού, τα είδη των φυτών, το χρόνο (στάδιο ανάπτυξης φυτού), και το βάθος του εδάφους που βρίσκονται οι ρίζες (Six et al., 2004). Μεγάλες ποσότητες οργανικού υλικού απελευθερώνονται στα εδάφη από τις ρίζες (ριζοεναπόθεση), ειδικά στα ζεστά- υγρά κλίματα. Έτσι, μία μεγάλη δραστήρια μικροβιακή βιομάζα αναπτύσσεται στη ριζόσφαιρα. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι οι ρίζες, τα τριχίδια των ριζών και οι υφές απορροφούν νερό από το γύρω χώμα προκαλώντας

έτσι τοπική ξηρασία, η οποία μπορεί να έχει το ίδιο σταθεροποιητικές όσο, όμως, και καταστροφικές επιρροές στα μακρο-συσσωματώματα (Haynes and Beare, 1996).

2.3.4.4 ΜΙΚΡΟΠΑΝΙΔΑ & ΜΑΚΡΟΠΑΝΙΔΑ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η μικροπανίδα του εδάφους είναι σημαντικός παράγοντος στο σχηματισμό των μακρο-συσσωματωμάτων. Η μικροπανίδα αποτελείται από γαιοσκώληκες και τερμίτες με κύρια ομάδα στα εδάφη των εύκρατων περιοχών να είναι οι γαιοσκώληκες όπου μπορεί ο πληθυσμός τους να φτάσει τα 1000-2000 άτομα ανά τ.μ. (Six et al., 2004). Οι Bossuyt et al, το 2005 παρατήρησαν ότι σε εδάφη με παρουσία γαιοσκωλήκων η μάζα των μικρο-συσσωματωμάτων εντός των μακρο-συσσωματωμάτων, που περιέχουν καινούργιο και προστατευμένο άνθρακα, είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με εδάφη χωρίς γαιοσκώληκες (ποσοστό μικρο-συσσωματωμάτων 25% προς 6% αντίστοιχα). Καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η παρουσία γαιοσκωλήκων έχει άμεση και γρήγορη επίδραση στο σχηματισμό των μικρο-συσσωματωμάτων και τη σταθεροποίηση του καινούργιου άνθρακα μέσα στα μικρο-συσσωματώματα (Bossuyt et al., 2005). Οι γαιοσκώληκες συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό στη συσσωμάτωση αξιοποιώντας τα φυτικά υπολείμματα μαζί με το χώμα, περνώντας τα από το έντερό τους και εκκρίνοντας υγρά που προκύπτουν από ζύμωση. Οι γαιοσκώληκες επομένως μεσολαβούν στο σχηματισμό και των μικρο και μακρο συσσωματωμάτων στα εδάφη, η σταθερότητα των οποίων εξαρτάται από την ποιότητα του οργανικού υλικού που καταναλώνεται από τους γαιοσκώληκες. Επιπλέον συντελούν στο σχηματισμό των συσσωματωμάτων καθώς τρυπώνουν στο έδαφος όπου εναποθέτουν βλεννώδεις υλικό στα τοιχώματα των λαγουμιών το οποίο μαζί με την άργιλο του εδάφους μπορεί να δημιουργήσει μία σταθερή δομή (Six et al., 2004).

Οι Helfrich et al. το 2008 διαπίστωσαν ότι ο σχηματισμός μακρο συσσωματωμάτων φαίνεται να παρουσιάζει μια σημαντική καθυστέρηση (28-42 ημέρες) σε εδάφη που έχει γίνει εφαρμογή μυκητοκτόνων συγκριτικά με εδάφη που δεν έχουν υποστεί

τέτοια μεταχείριση, υπογραμμίζοντας τη σημασία των μυκήτων στο σχηματισμό των συσσωματωμάτων (Helfrich et al., 2008). Ο Rillig το 2004 αναφέρει ότι οι μύκητες arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) παίζουν σημαντικό ρόλο στα αγροοικοσυστήματα, συμπεριλαμβανομένου του ρόλου που έχουν τα εξωτερικά τους μικκύλια στο να προάγουν τη συσσωμάτωση (Rillig, 2004). Η Γλομαλίνη είναι μία γλυκοπρωτεΐνη που παράγεται σε αφθονία στις υφές και τα σπόρια αυτών των μυκήτων-μυκόριζων στο χώμα και στις ρίζες των φυτών και έχει αποδειχθεί ότι συσχετίζονται με τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων. Το 1998 οι Wright και Uradhaya είχαν αποδείξει ότι η γλομαλίνη σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με τη συσσωμάτωση και τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων κατόπιν υγρής κοσκίνισης σε αποξηραμένα δείγματα, για μεγάλο εύρος εδαφών (Wright and Uradhaya, 1998). Παρατηρήθηκε επίσης ότι η εύκολα εκχυλίσιμη γλομαλίνη ήταν πιο στενά συσχετισμένη με την σταθερότητα των συσσωματωμάτων συγκριτικά με τη συνολική γλομαλίνη .

2.3.4.5 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Περιβαλλοντικές μεταβλητές όπως οι διαδικασίες ψύξης-απόψυξης, ο κύκλος ξηρασίας-υγρασίας, και οι πυρκαγιές επηρεάζουν σημαντικά τη συσσωμάτωση (Six et al., 2004). Ο βαθμός της συσσωμάτωσης σχετίζεται ακόμη και με τις κλιματικές συνθήκες κάτω από τις οποίες σχηματίστηκε το έδαφος. Όσο ο δείκτης βροχόπτωσης/δυσνητικής-εξατμισοδιαπνοής αυξάνεται τόσο το ποσοστό ιλύς-αργίλου που συσσωματώνεται αυξάνεται έως ότου φτάσει μια μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί σε αναλογία βροχόπτωσης/δυσνητικής-εξατμισοδιαπνοής από 0,4 έως 0,6.

2.4 ΕΔΑΦΟΣ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι επιπλέον εκπομπές CO₂ με την καταστροφή των συσσωματωμάτων λόγω του περισσότερο βιοπροσβιβάσιμου άνθρακα, αναμένεται με τη σειρά τους να έχουν επίδραση στο κλίμα, με αλλαγές σε αυτό λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006). Οποιαδήποτε ενίσχυση των

συγκεντρώσεων αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα θα επιταχύνει το ρυθμό θέρμανσης η οποία με τη σειρά της θα αλλάξει την πρωτογενή παραγωγικότητα (net primary productivity, NPP), την εισαγωγή C στο έδαφος, τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος και τελικά θα οδηγήσει στην απελευθέρωση περαιτέρω CO₂ από το έδαφος (Krull et al., 2004). Το φαινόμενο του θερμοκηπίου με τη σειρά του οδηγεί σε ακραία καιρικά φαινόμενα όπως η διάβρωση, οι κατολισθήσεις, η αλάτωση, αλλά και η μείωση της οργανικής ύλης (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006).

Η διάβρωση, η μείωση της οργανικής ύλης, η μείωση της βιοποικιλότητας και η συμπίεση του εδάφους αποτελούν αλληλο-συσχετιζόμενες απειλές των λειτουργιών του εδάφους που ζημιώνουν την γονιμότητα του και το καθιστούν ευαίσθητο στην ερημοποίηση (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2002), με συνέπειες σχετικά με την ασφάλεια και διασφάλιση της ποιότητας των τροφίμων, τις κλιματικές αλλαγές, την ποιότητα του νερού, και την οικονομία (Lal, 2004), απειλώντας εν τέλει τη βιώσιμη ανάπτυξη (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2001).

Ο Lal (2002) υποστήριξε ότι ενώ η ανάπτυξη των δασών θεωρείται η πιο αποδοτική επιλογή για την απορρόφηση των αερίων θερμοκηπίου για πάνω από 25-30 χρόνια, η συσσώρευση του άνθρακα στα γεωργικά εδάφη δεν συμβάλει μόνο στη συσσώρευση του αερίου C που συνευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλά επίσης συμβάλει στην ενίσχυση της ποιότητας του εδάφους και στην αγροτική παραγωγικότητα (Lal, 2002). Ενδεδειγμένες πρακτικές διαχείρισης της γης όπως είναι η βιολογική και ολοκληρωμένη γεωργία ή πρακτικές εκτατικής γεωργίας σε ορεινές περιοχές μπορούν να διατηρούν και να βελτιώνουν την οργανική ύλη στο έδαφος και να συμβάλουν επομένως και στην πρόληψη κατολισθήσεων και στον μετριασμό των κλιματικών αλλαγών (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006). Όμως η συσσώρευση άνθρακα στα αγροτικά εδάφη εξαρτάται και από ποικιλία παραγόντων όπως τα υπάρχοντα επίπεδα C στο έδαφος, ο τύπος του εδάφους, το κλίμα και οι πρακτικές διαχείρισης (Smith et al., 2007). Επειδή το SOC αποτελείται από αρκετές δεξαμενές οι οποίες δρουν με διαφορετικό τρόπο και σε ορισμένη

χρονική κλίμακα, η αξία του SOC δε μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας απλά την αύξησή του ως μέτρο στα καλλιεργήσιμα εδάφη.

Τα πλεονεκτήματα λοιπόν της αύξησης των αποθεμάτων του SOC υιοθετώντας ‘σωστές’ πρακτικές διαχείρισης εκτείνονται περαιτέρω από το πολυσυζητημένο σύστημα προσρόφησης των αερίων θερμοκηπίου. Στην πραγματικότητα, τα άμεσα πλεονεκτήματα της αυξημένης περιεκτικότητας σε SOC περιλαμβάνουν αυξημένη και πιο ποιοτική αγροτική παραγωγή, αειφορία, και πάνω από όλα, αναβαθμισμένη ποιότητα εδάφους (Stockmann et al., 2011).

Είναι επομένως πρωταρχικής σπουδαιότητας να επαναξιολογηθούν οι πρακτικές που χρησιμοποιούνται στη γεωργία και να αναπτυχθούν εναλλακτικά βιώσιμα συστήματα διαχείρισης των γεωργικών εδαφών που θα προστατεύουν παρά θα υποβαθμίζουν τα εδάφη. Το κόστος της υποβάθμισης του εδάφους μπορεί να ανέλθει και στα 38€ δις ετησίως (ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006).

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή της μελέτης είναι ο οικισμός Μηλιά Χανίων. Η Μηλιά βρίσκεται στα ημιορεινά (500 μ. υψόμετρο) σε μία εξοχική τοποθεσία της επαρχίας Κισσάμου του Νομού Χανίων, και το κοντινότερο χωριό είναι το Βλάτος, σε απόσταση 4.5 χιλιομέτρων. Είναι χτισμένη στην πλαγιά του βουνού που σχηματίζει μια μικρή κοιλάδα και είναι κυριολεκτικά περιτριγυρισμένη από ένα μοναδικό φυσικό περιβάλλον, που καλύπτεται από μία πολύ μεγάλη ποικιλία φυτών και δέντρων. Ο χώρος γύρω από τον οικισμό είναι περίπου 1200 στρέμματα.

Το 1982 που πάρθηκε η απόφαση της περιβαλλοντικής αναβάθμισης και ανασύλωσης του μεσαιωνικού οικισμού, η Μηλιά ήταν ένας τόπος όπου η ασύδοτη ανθρώπινη συμπεριφορά (φωτιές, υπερβόσκηση) είχαν προκαλέσει την διάβρωση του εδάφους και την ελαχιστοποίηση του νερού, το οποίο βέβαια είναι ζωτικό στοιχείο για τον τόπο. Η γη άρχισε συστηματικά να καλλιεργείται και μερικές χιλιάδες δέντρα, τα περισσότερα από τα οποία είναι ενδημικά, φυτεύτηκαν. Έγινε περίφραξη και αντιτυρικές ζώνες στην περίμετρο του κτήματος. Το 1991 ξεκίνησαν οι εργασίες ανασύλωσης και ολοκληρώθηκαν το 1994.

Τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται κυρίως το έδαφος είναι σχιστόλιθοι, φυλλίτες και χαλαζίτες. Παρακάτω γίνεται μία σύντομη περιγραφή αυτών των τριών ειδών πετρωμάτων.

Οι σχιστόλιθοι είναι μεσαίου βαθμού μεταμορφωμένα πετρώματα που σχηματίζονται από τη μεταμόρφωση του mudstone / shale, ή κάποιων άλλων τύπων ηφαιστειακών πετρωμάτων σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι ο slate, δηλαδή έχουν υποβληθεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις. Η προκύπτουσα μορφή, που συχνά αναφέρεται ως schistosity, είναι πιο χονδρόκοκη και πιο διακριτή από

εκείνη του slate, λόγω του υψηλότερου βαθμού κρυστάλλωσης των ορυκτών μαρμαρυγία (βιοτίτη, χλωρίτη, μοσχοβίτη), τα οποία σχηματίζονται από μεγαλύτερους κρυστάλλους. Αυτοί οι μεγαλύτεροι κρύσταλλοι αντανακλούν το φως, έτσι ώστε ο σχιστόλιθος να έχει συχνά μια μεγάλη λάμψη. Η ύπαρξη Porphyroblasts είναι κοινή στο σχιστόλιθο, παρέχοντας πληροφορίες για τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης υπό τις οποίες σχηματίστηκε ο βράχος. Λόγω πιο ακραίων συνθηκών σχηματισμού, οι σχιστόλιθοι παρουσιάζουν συχνά πολύπλοκα μοτίβα αναδίπλωσης. Υπάρχουν διάφορες ποικιλίες σχιστόλιθων και παίρνουν το όνομά τους από το κυρίαρχο ορυκτό που περιλαμβάνεται στο βράχο, π.χ. σχιστόλιθος μαρμαρυγία, πράσινος σχιστόλιθος (πράσινος, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε χλωρίτη), σχιστόλιθος γρανάτης κλπ. ("Schist," 2005)



Εικόνα 3-1 Σχιστόλιθος ("Schist," 2005)

Ο χαλαζίτης είναι επίσης ένα μεταμορφωμένο πέτρωμα που σχηματίζεται όταν χαλαζίας πλούσιος σε ψαμμίτη ή πυριτόλιθο εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. Τέτοιες συνθήκες βοηθούν στην ένωση των κόκκων χαλαζία σχηματίζοντας



Εικόνα 3-2 Χαλαζίτης ("Quartzite," 2005)

ένα πυκνό, σκληρό, equigranular βράχο. Ο χαλαζίτης περιλαμβάνει γενικά περισσότερο από 90 % χαλαζία, και κάποια παραδείγματα, σύμφωνα με τα οποία περιέχει μέχρι 99% χαλαζία, αποτελούν τις μεγαλύτερες και πιο αμιγές

συγκεντρώσεις του διοξειδίου του πυριτίου στο φλοιό της Γης. Αν και ένα πέτρωμα ψαμμίτη πλούσιο σε χαλαζία μπορεί να μοιάζει με χαλαζίτη, μία φρεσκοσπασμένη επιφάνεια χαλαζίτη θα δείξει θραύση σε κόκκους χαλαζία, ενώ η αντίστοιχη του ψαμμίτη θα σπάσει γύρω από κόκκους χαλαζία. Οι χαλαζίτες τείνουν επίσης να έχουν ζαχαρί χρώμα και υαλώδη λάμψη. Η ποικιλία των χρωμάτων που εμφανίζονται στους χαλαζίτες είναι συνέπεια ύπαρξης μικρών ποσοτήτων ακαθαρσιών που ενσωματώνονται με το χαλαζία κατά τη διάρκεια της μεταμόρφωσης. Αν και ο χαλαζίτης μπορεί μερικές φορές να φαίνεται επιφανειακά παρόμοιος με την όψη ενός μαρμάρου, ένα κομμάτι χαλαζίτη δεν θα είναι σε θέση να γρατζουνιστεί από μια λεπίδα μετάλλων, καθώς επίσης ένας χαλαζίτης δεν θα βγάλει ήχο όταν έρθει σε επαφή με αραιό υδροχλωρικό οξύ ("Quartzite," 2005).

Οι φυλλίτες είναι ένα βήμα πέρα από τους σχιστόλιθους στην αλυσίδα της περιφερειακής μεταμόρφωσης. Η λέξη «φυλλίτης» προέρχεται από τη λατινική γλώσσα και σημαίνει "φύλλο-πέτρα." Είναι συνήθως μία γκρι ή πρασινωπή πέτρα. Ο φυλλίτης δείχνει μία λαμπερότητα λόγω των μικροσκοπικών κόκκων των sericitic μαρμαρυγία, γραφίτη, χλωρίτη και των



Εικόνα 3-3 Φυλλίτης (Alden, 2013)

παρόμοιων ορυκτών. Επιπλέον, σε αντίθεση με τον σχιστόλιθο που συνήθως σπάει σε πολύ επίπεδα φύλλα, οι φυλλίτες τείνουν να έχουν μια κυματοειδή διάσπαση. Αυτό το πέτρωμα έχει χάσει σχεδόν ολόκληρη την αρχική ιζηματογενή δομή, αν και ορισμένα από τα αργίλικα ορυκτά του παραμένουν. Περαιτέρω μεταμόρφωση μετατρέπει όλες τις αργίλους σε μεγάλους κόκκους μαρμαρυγία, μαζί με χαλαζία και αστρίων. Σε αυτό το σημείο, οι φυλλίτες μετατρέπονται σε σχιστόλιθους (Alden, 2013).

3.2 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ

Η δειγματοληψία στην περιοχή της Μηλιάς Χανίων έλαβε μέρος στις 6 Νοέμβρη 2012.



Εικόνα 3-4 Δειγματοληψία

Επιλέχθηκαν 3 χωράφια με διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές :

1. Χωράφι με προσθήκη compost 2 φορές κάθε χρόνο (Απρ. & Νοεμβ.) τα τελευταία 10 χρονιά .
2. Χωράφι με προσθήκη compost 2 φορές κάθε χρόνο (Απρ. & Νοεμβ.) τα πρώτα 8 χρονιά και σε αγρανάπαυση τα 2 τελευταία χρόνια.
3. Χωράφι με προσθήκη compost 2 φορές τον χρόνο (Απρ. & Νοεμβ.) κάθε 3 χρόνια την τελευταία 10ετία.

Επίσης έγινε δειγματοληψία δείγματος (C) σε περιοχή όπου δεν έγινε καμία προσθήκη compost ώστε να εκτιμηθεί η αρχική κατάσταση των χωραφιών.

Το βάθος των δειγμάτων είναι 12 cm.



Εικόνα 3-5 Από αριστερά προς δεξιά : 1^ο , 2^ο , 3^ο χωράφι δειγματοληψίας

Χαρακτηριστικά εδαφοβελτιωτικού (Compost) που χρησιμοποιούνται στα χωράφια:

- Συνδυασμός φυτικών υπολειμμάτων και κοπριάς σε αναλογία 70% - 30%
- Περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα : 14,5 %
- Περιεκτικότητα σε Άζωτο : 2,4 %
- SOC/SON = 6,1
- Ποσότητα : 1 m³ / γρ σε χωράφι 2,5 m X 33 m = **82.5 m²** (121,2 m³ / ha)
- Πυκνότητα : 446 Kg / m³

Ποσότητα εισερχόμενου άνθρακα :

$$1 \text{ m}^3 \text{ compost /yr} * 446 \text{ Kg/ m}^3 = 446 \text{ kg/yr}$$

Για ένα χρόνο:

$$446 \text{ kg} / 82.5 \text{ m}^2 = 5.4 \text{ kg/m}^2 = 54 \text{ tn / ha}$$

$$54 \text{ tn /ha compost} * 0.145 \text{ OC} = \underline{\underline{7,8 \text{ tn C / ha}}}$$

Οπότε χωρίζουμε την ποσότητα άνθρακα που εισέρχεται από το compost στο χωράφι στις 2 φορές που έχουμε εφαρμογή (Απρίλιο & Νοέμβρη) μέσα στον χρόνο.

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ

4.1 ΥΓΡΑΣΙΑ

Αρχικά τα 4 επιφανειακά δείγματα που επιλέχθηκαν για μελέτη απλώθηκαν για 24 ώρες με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας με φυσική ξήρανση. Την φυσική διαδικασία της ξήρανσης ακολούθησε η ξήρανση των δειγμάτων σε φούρνο στους 40°C για 1 ημέρα με σκοπό την ολική απομάκρυνση της απομένουσας υγρασίας από τα δείγματα.

Την διαδικασία της ξήρανσης ακολούθησε κοσκίνιση των δειγμάτων με σκοπό την κατακράτηση και διαχωρισμό υπολειμμάτων από φύλλα και χάλικες διαμέτρου $d > 2\text{mm}$.

4.2 ΜΕΤΡΗΣΗ pH & ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ (EC)

Το pH είναι ένας εύχρηστος τρόπος έκφρασης της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου σε ένα υδατικό διάλυμα. Συγκεκριμένα, με "pH" συμβολίζεται ο αρνητικός δεκαδικός λογάριθμος της συγκέντρωσης των ιόντων υδρογόνου $[\text{H}^+]$ σε ένα διάλυμα. Δηλαδή: $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$. Το pH αποτελεί μέτρο οξύτητας ή αλκαλικότητας μιας χημικής ουσίας, εξου και αναφέρεται ως ενεργός οξύτητα.

Για την μέτρηση του pH των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε το φορητό πεχάμετρο της εταιρείας Orion, 250A. Η μέτρηση του pH πραγματοποιήθηκε με ειδικά ηλεκτρόδια, χρησιμοποιώντας την αρχή της ποτενσιομετρικής μέτρησης του pH, που προσδιορίζει την ενεργότητα των ιόντων υδρογόνου σε ένα διάλυμα. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε με την χρήση ενός ενδεικτικού ηλεκτροδίου και ενός ηλεκτροδίου αναφοράς. Το δυναμικό του ενδεικτικού ηλεκτροδίου εξαρτάται εκλεκτικά από την ενεργότητα των ιόντων υδρογόνου στο διάλυμα. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δυο ηλεκτρόδια, έπειτα από βαθμονόμηση, δίνει το pH.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα διαλύματος είναι μια μαθηματική έκφραση της ικανότητας ενός υδατικού διαλύματος να άγει το ηλεκτρικό ρεύμα. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την παρουσία ιόντων, το σθένος τους, την κινητικότητα τους, τη συγκέντρωσή τους, τη θερμοκρασία, το ιξώδες του διαλύματος και το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού, με την οποία γίνεται η μέτρηση. Μετριέται σε Siemens (S) και είναι το αντίστροφο της αντίστασης.

Η εργαστηριακή μέτρηση του pH είχε ως εξής:

1. Προσθήκη 20 gr από κάθε δείγμα σε beaker
2. Προσθήκη 50 ml απιονισμένου νερού και της EC τα beaker
3. Ανάδευση διαλυμάτων
4. Στην συνέχεια τα δείγματα αφήνονται σε ηρεμία για 30 λεπτά
5. Βαθμονόμηση του πεχαμέτρου
6. Μέτρηση του pH, με προσεκτική τοποθέτηση του ηλεκτροδίου στο διάλυμα αποφεύγοντας να ακουμπήσει στο ίζημα που έχει δημιουργηθεί.
7. Η διαδικασία μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ολοκληρώνεται με τοποθέτηση του ηλεκτροδίου στο εκχύλισμα και σημείωση της ένδειξης.

4.3 ΚΟΚΟΜΕΤΡΙΑ

Με την μέθοδο της κοκκομετρικής ανάλυσης προσδιορίζονται οι διαστάσεις των κόκκων ενός μείγματος και μελετάται η κατανομή τους στη μάζα του συνδετικού υλικού μέσα στο οποίο περιέχονται.

Οι πληροφορίες που εξάγονται από την κοκκομετρική ανάλυση μας διευκολύνουν να προβλέψουμε τη συμπεριφορά των εδαφών, όσον αφορά τη δυνατότητα

κίνησης του υπόγειου νερού (διήθηση) μέσα από τα κενά μεταξύ των κόκκων και να εκτιμήσουμε δυνατότητα μεταφοράς ρύπων στον υπόγειο υδροφόρο τους, αλλά και την δυνατότητα προσρόφησης τους στους πόρους του δείγματος.

Για την κοκκομετρική ανάλυση στα δείγματα χρησιμοποιήθηκε το αντιδραστήριο πολυφωσφορικό νάτριο (Na_3PO_4) και η μέτρηση έγινε σύμφωνα με την μέθοδο (Βουγουκος, 1962) και για τα 4 δείγματα. Η διαδικασία έχει ως εξής:

1. Ζύγισμα 80 gr δείγματος
2. Προσθήκη του ζυγισμένου δείγματος σε ποτήρι ζέσεως 250 ml
3. Προσθήκη 125 ml διαλύματος πολυφωσφορικού νατρίου (Na_3PO_4) 40 gr/lit στο ποτήρι ζέσεως.
4. Τοποθέτηση του δείγματος σε ανάδευση για 24 ώρες,



Εικόνα 4-1 Ανάδευση δειγμάτων για κοκκομετρία

5. Έπειτα κτύπημα του δείγματος σε mixer για 1 λεπτό.
6. Προσθήκη του δείγματος σε ογκομετρικό κύλινδρο των 1200 ml .
7. Προσθήκη απιονισμένου νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο μέχρι την τιμή των 1000 ml.
8. Ανάδευση του δείγματος 5 φορές με έμβολο
9. Τοποθέτηση αερόμετρου στον ογκομετρικό κύλινδρο

10. Με το πέρας 40 δευτερολέπτων από την τοποθέτηση του αερομέτρου σημειώνεται η πρώτη μέτρηση και ακολουθούν μετρήσεις στα 2 , 5 , 15 , 30 λεπτά και 1 , 4 , 24 ώρες.



Εικόνα 4-2 πειραματική διάταξη κοκκομετρίας

4.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ (WSA)

Απαιτούνται 40 gr από δείγματα (κοσκινισμένα σε 8 mm) αδιατάραχτου εδάφους.

1. Τοποθέτηση ενός κόσκινου 2000 μm σε μια λεκάνη και γέμισμα με απιονισμένο νερό μέχρι το νερό να φθάσει το 1.5 cm πάνω από το πλέγμα του κόσκινου.
2. Βύθισμα 40 gr ξηραμένου με αέρα εδάφους στο νερό πάνω από το κόσκινο των 2000 μm . Αφήνεται το δείγμα σε κατάσταση ηρεμίας για 5 min έτσι ώστε να επιτραπεί το μούλιασμα και η κατακάθιση των ασταθών συσσωματωμάτων.



Εικόνα 4-3 Δείγμα εδάφους στο κόσκινο 2 mm σε ηρεμία

3. Κοσκίνισμα του χώματος χειροκίνητα κουνώντας το κόσκινο πάνω κάτω για περισσότερο από 2 min βάζοντας και βγάζοντας το κόσκινο από το νερό.

4. Συλλογή συσσωματωμάτων ($> 2000 \mu\text{m}$) που έχουνε παραμείνει πάνω στο κόσκινο των $2000 \mu\text{m}$.
5. Τοποθέτηση ενός κόσκινου $1000 \mu\text{m}$ σε μία λεκάνη.
6. Μεταφορά των κόκκων και του νερού που διήλθαν από το κόσκινο των $2000 \mu\text{m}$ πάνω από το κόσκινο των $1000 \mu\text{m}$.
7. Κοσκίνισμα του χώματος χειροκίνητα με ανοδικές και καθοδικές κινήσεις.
8. Συλλογή των συσσωματωμάτων ($1000 \mu\text{m} - 2000 \mu\text{m}$) που παρέμειναν στην κορυφή του κόσκινου των $1000 \mu\text{m}$ σε ένα αλουμινένιο, προζυγισμένο ταψί με κατάλληλη ετικέτα.



Εικόνα 4-4 Έδαφος στο κόσκινο των $53 \mu\text{m}$



Εικόνα 4-5 Τα 4 κλάσματα που δημιουργήθηκαν

9. Επανάληψη της διαδικασίας με κόσκινο $250 \mu\text{m}$, έπειτα με κόσκινα $53 \mu\text{m}$. Συλλογή και μεταφορά των συστατικών ($250-1000 \mu\text{m}$, $53-250 \mu\text{m}$ και $<53 \mu\text{m}$) σε αλουμινένια, προζυγισμένα ταψιά με κατάλληλες ετικέτες.

10. Ξήρανση σε φούρνο (στους 40°C) των 5 κλασμάτων από τα συσσωματώματα ($>2000 \mu\text{m}$, $1000 - 2000 \mu\text{m}$, $250 - 1000 \mu\text{m}$, $53 - 250 \mu\text{m}$, $<53 \mu\text{m}$), ζύγισμα και αποθήκευση αυτών σε θερμοκρασίας δωματίου.

11. Επανάληψη των βημάτων για τα άλλα δύο δείγματα εδάφους (επανάληψη διαδικασίας WSA τρεις φορές).

4.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΑΜΜΟΥ

Κατά τη διαδικασία του κοσκινίσματος τόσο τα συσσωματώματα όσο και τα σωματίδια άμμου ίδιου μεγέθους διατηρήθηκαν στα ταψιά. Έγινε ο προσδιορισμός των συστατικών της άμμου στα κλάσματα συσσωματωμάτων με διάλυση κάθε κλάσματος σε εξαμεταφωσφορικό νάτριο (0.5 %) για 18 h σε περιστροφικό αναδευτήρα στις 190 rpm. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:

1. Δημιουργία 4 επιμέρους δειγμάτων από κάθε κλάσμα (>2000 μm , 1000 – 2000 μm , 250 – 1000 μm , 53 – 250 μm). Για παράδειγμα, όσον αφορά το κλάσμα 1000 – 2000 μm , συνδυάζονται συσσωματώματα που έχουν αποθηκευτεί από τη διαδικασία WSA (1000 – 2000 μm – 1^η επανάληψη) με τα αντίστοιχα κλάσματα από τη δεύτερη (1000 – 2000 μm – 2^η επανάληψη) και την (1000 – 2000 μm – 3^η επανάληψη) τρίτη επανάληψη.
2. Διάλυση 10 gr του κάθε νέου δείγματος σε διάλυμα 25 ml εξαμεταφωσφορικού νατρίου (0.5 %) για 18 h σε περιστροφικό αναδευτήρα στις 190 rpm και σε θερμοκρασία δωματίου.

Επιμέρους δείγμα > 2000 μm

1. Μετά τη διάλυση του επιμέρους δείγματος > 2000 μm , το διάλυμα μεταφέρεται πάνω από τη σειρά των 4 κοσκίνων (2000, 1000, 250 και 53 μm). Πλύσιμο και συλλογή των υπο – κλασμάτων άνω των 2000 μm σε αλουμινένιο ταψί. Επανάληψη της διαδικασίας και συλλογή κλασμάτων από τα υπόλοιπα υποκλάσματα.



Εικόνα 4-6 Απεικόνιση διάταξης κοσκίνων στη διόρθωση άμμου

2. Ξήρανση σε φούρνο (στους 60°C) των πέντε υποκλασμάτων συσσωματωμάτων ($>2000\ \mu\text{m}$, $53\text{-}250\ \mu\text{m}$, $<53\ \mu\text{m}$) και ζύγισμα αυτών. Η άμμος που διατηρήθηκε στο κόσκινο των $2000\ \mu\text{m}$ θα χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση άμμου.



Εικόνα 4-7 Άμμος στο δείγμα $>2\text{mm}$

Επιμέρους δείγμα $1000 - 2000\ \mu\text{m}$

1. Μετά τη διάλυση του επιμέρους δείγματος $1000 - 2000\ \mu\text{m}$, το διάλυμα μεταφέρεται πάνω από τη σειρά των 3 κοσκίνων (1000 , 250 και $53\ \mu\text{m}$).
2. Επανάληψη των βημάτων που προαναφέρθηκαν, πλύσιμο και διόρθωση των δύο υποκλασμάτων ($1000 - 2000\ \mu\text{m}$, $250 - 1000\ \mu\text{m}$, $53 - 250\ \mu\text{m}$, $<53\ \mu\text{m}$) σε προζυγισμένα αλουμινένια ταψιά.

3. Ξήρανση σε φούρνο (στους 60°C) των τεσσάρων υποκλασμάτων συσσωματωμάτων και ζύγισμα αυτών. Η άμμος που διατηρήθηκε στο κόσκινο των 1000 μm θα χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση άμμου.

Επιμέρους δείγμα 250 - 1000 μm

1. Επανάληψη της διαδικασίας που προαναφέρθηκε με μία σειρά από 2 κόσκινα (250 και 53 μm), πλύσιμο και διόρθωση των τριών υποκλασμάτων (250 – 1000 μm , 53 – 250 μm , <53 μm).
2. Ξήρανση σε φούρνο (στους 60°C) των υποκλασμάτων και ζύγισμα αυτών. Η άμμος που διατηρήθηκε στο κόσκινο των 250 μm θα χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση άμμου.

Επιμέρους δείγμα 53 - 250 μm



1. Επανάληψη της διαδικασίας που προαναφέρθηκε με το κόσκινο των 53 μm .

2. Ξήρανση σε φούρνο (στους 60°C) των δύο υποκλασμάτων (53 – 250 μm , <53 μm) και ζύγισμα αυτών. Η άμμος που διατηρήθηκε στο κόσκινο των 53 μm θα χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση άμμου.

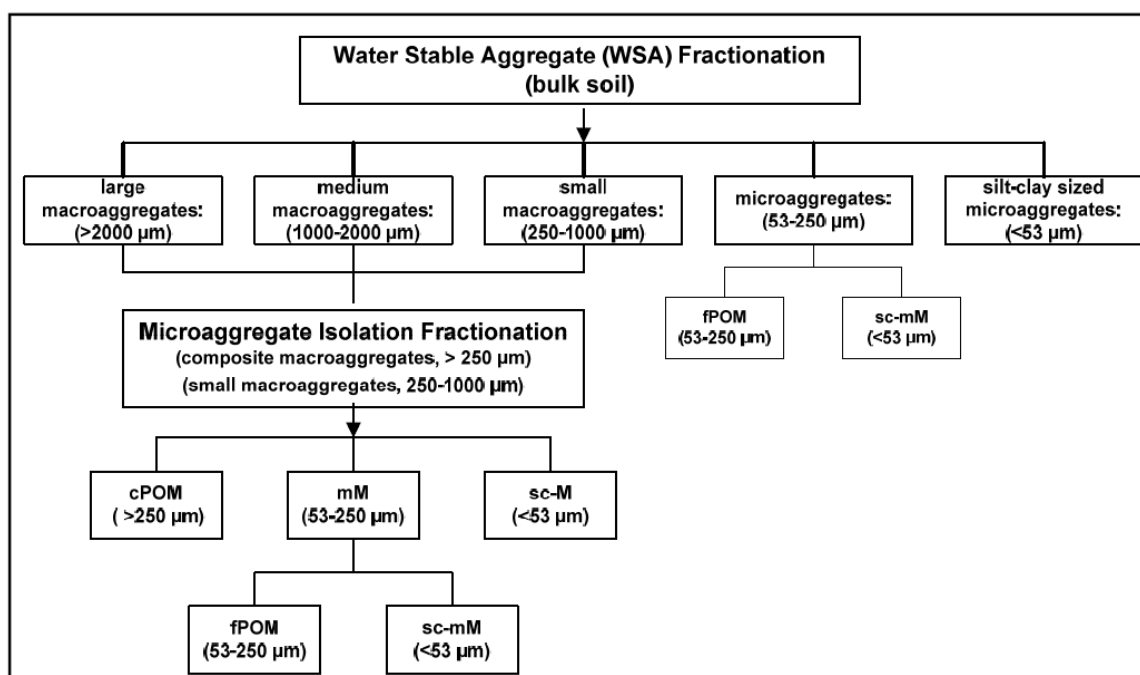
Εικόνα 4-8 Δείγμα 53-250 μm

4.6 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΠΟΜΟΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΜΙΚΡΟΣΥΣΣΩΜΑΤΩΝ

Για να αποκαλυφθούν πιθανές διαφορές στη σύνθεση και στους ρυθμούς μετατροπής των μακροσυσσωμάτων των διαφόρων μεγεθών και των μοτίβων των συχνοτήτων αποσύνθεσης, εφαρμόστηκε η διαδικασία στα δείγματα των μικρών (250 - 1000 μm) και των σύνθετων μακροσυσσωμάτων (>250 μm).

Επιμέρους δείγμα > 250 μm

Ένα επιμέρους δείγμα (10 gr) των μικρών μακροσυσσωμάτων (250 με 1000 μm) και των σύνθετων μακροσυσσωμάτων (>250 μm) είναι διαχωρισμένο από τα παραπάνω κλάσματα με τη διαδικασία απομόνωσης μικροσυσσωμάτων σύμφωνα με (Kong et al., 2005; Lichter et al., 2008) σε : i) χονδρή σωματιδιακή οργανική ύλη και άμμο (cPOM: >250 μm), ii) μικροσυσσωματώματα (mM: 53-250 μm) και iii) ευκολοδιάλυτα κλάσματα ιλύος-αργίλου (sc-M <53 μm).



Εικόνα 4-9 Κλάσματα δείγματος (TUC HERS LAB, 2012)

1. Βύθισμα ενός επιμέρους δείγματος 10 gr του κλάσματος συσσωματωμάτων σε απιονισμένο νερό στην κορυφή των 250 mm πλέγματος κοσκίνου.
2. Απαλή ανακίνηση του χώματος με 50 γυάλινες μπίλιες (διαμέτρου 4 mm) με συνεχόμενη και σταθερή ροή νερού.

3. Όταν όλα τα μακροσυσσωματώματα διασπαστούν, ακολουθεί συλλογή του υλικού που βρίσκεται πάνω από το κόσκινο (cPOM) των 250 μm και των 53 μm (mM).
4. Κοσκίνισμα του mM υλικού και συλλογή των δύο τμημάτων των 53 - 250 μm (fPOM) και των <53 μm (sc-M).
5. Ξήρανση των τριών κλασμάτων στους 40°C, ζύγισμα και αποθήκευση αυτών σε γυάλινα δοχεία σε θερμοκρασία δωματίου.

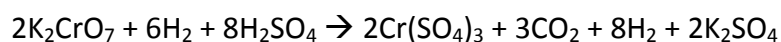
Επιμέρους δείγμα 53 - 250 μm

Ένα επιμέρους δείγμα (10 gr) των μικρών μακροσυσσωμάτων (250 με 1000 μm) είναι περεταίρω διαχωρισμένο στα ακόλουθα : i) μικροσυσσωματώματα (mM: 53-250 μm) και ii) ευκολοδιάλυτα κλάσματα ιλύος-αργίλου (sc-M <53 μm).

1. Βύθισμα ενός επιμέρους δείγματος 10 gr του κλάσματος συσσωματωμάτων σε απιονισμένο νερό στην κορυφή των 53 mm πλέγματος κοσκίνου.
2. Απαλή ανακίνηση του χώματος με 50 γυάλινες μπίλιες (διαμέτρου 4 mm) με συνεχόμενη και σταθερή ροή νερού.
3. Όταν όλα τα μακροσυσσωματώματα διασπαστούν, ακολουθεί συλλογή του υλικού που βρίσκεται πάνω από το κόσκινο (mM) των 53 μm .
4. Ξήρανση των τριών κλασμάτων στους 40°C, ζύγισμα και αποθήκευση αυτών σε γυάλινα δοχεία σε θερμοκρασία δωματίου.

4.7 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟC

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση της οργανικής ύλης των δειγμάτων, είναι η στοιχειομετρική μέθοδος της υγρής καύσης (Walkey and Black, 1934) κατά την οποία ο οργανικός άνθρακας οξειδώνεται από διχρωμικό κάλιο παρουσία πυκνού θειικού οξέους. Η ποσότητα του διχρωμικού καλίου που δεν ανάγεται καθορίζεται με τιτλοδότηση του δείγματος με θειικό σίδηρο και στοιχειομετρική ανάλυση. Η οργανική ύλη του εδάφους υπολογίζεται με την διαφορά μεταξύ συνολικού όγκου του προστιθέμενου διχρωμικού άλατος και του όγκου που τιτλοδοτείται μετά από την αντίδραση. Η βαθμονόμηση του θειικού σιδήρου πραγματοποιείται με ένα τυφλό διάλυμα. Η μέθοδος μετράει την ποσότητα του άνθρακα από τα κατάλοιπα των φυτών και ζώων, συμπεριλαμβάνοντας τον χούμο του εδάφους, αποκλείοντας όμως το κάρβουνο και τους γαιάνθρακες. Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα όταν το διχρωμικό κάλιο αντιδρά με τον οργανικό άνθρακα του εδάφους είναι η εξής:



Η παραπάνω μέθοδος οξειδώνει περίπου το 70% του οργανικού άνθρακα που υπάρχει στο έδαφος, με συνέπεια να χρησιμοποιείται συντελεστής διόρθωσης για τα τελικά αποτελέσματα.

Η πειραματική διαδικασία έχει ως εξής:

1. Τοποθέτηση 0,5 gr χώματος από κάθε δείγμα σε κωνική φιάλη των 500ml
2. Τοποθέτηση σε κάθε φιάλη 10 ml διχρωμικό κάλιο και σε μία φιάλη που προορίζεται για τυφλό δείγμα
3. Προσθήκη 20 ml πυκνού θειικού οξέος για να μην οξειδωθεί ο σίδηρος
4. Τα δείγματα αντιδρούν κάτω από τον απαγωγό για 30 λεπτά

5. Συμπληρώνεται η κωνική φιάλη έως 200 ml με απιονισμένο νερό
6. Προστίθενται 10 ml ορθοφωσφορικό οξύ (H_3PO_4) με σκοπό να αλλάξει απότομα ο δείκτης χρώμα
7. Προσθήκη 1 ml του δείκτη διφαινυλαμίνη που αλλάζει το χρώμα του διαλύματος σε χαρακτηριστικό σκούρο μωβ μόλις πραγματοποιηθεί η εξουδετέρωση του διχρωμικού καλίου
8. Τα δείγματα τιτλοδοτούνται με θειικό σιδήρο ο οποίος προστίθεται στάγδην στο διάλυμα με ταυτόχρονη ανακίνηση της φιάλης
9. Με την πρώτη αλλαγή χρώματος του διαλύματος από σκούρο μωβ σε πράσινο σταματά η προσθήκη θειικού σιδήρου και σημειώνεται η ποσότητα θειικού σιδήρου που χρησιμοποιήθηκε.

Η μαθηματική εξίσωση που χρησιμοποιείται για την % ποσότητα του υπάρχοντος άνθρακα στο έδαφος είναι η εξής:

$$(\%C)(gr) = 10 \cdot (1 - B/A) \cdot (0,3 \cdot f/\Gamma)$$

- Όπου B = ml διαλύματος θειικού σιδήρου 0,5 N που απαιτείται για την τιτλοδότηση του δείγματος που περιέχει 1 gr δείγματος
- Και όπου A = ml διαλύματος θειικού σιδήρου 0,5 N που απαιτείται για την τιτλοδότηση του τυφλού διαλύματος, το οποίο δεν περιέχει δείγμα.
- f = συντελεστής μετατροπής 1 ml διαλύματος 1N $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_7$ σε άνθρακα
- Γ = ποσότητα δείγματος εδάφους που χρησιμοποιήθηκε σε gr

Η επί τοις εκατό (%) περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ύλη δίνεται από τον τύπο:

$$(\%C) \cdot 1,724 = 10 \cdot (1-B/A) \cdot (0.3 \cdot f/\Gamma) \cdot 1.724$$

Στην διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν:

- FeSO_4
- Διφαινυλαμίνη
- $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
- H_3PO_4
- H_2SO_4
- Απιονισμένο νερό



Εικόνα 4-10 Προσθήκη $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ στα δείγματα

4.8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

- **Υγρασία**

ΔΕΙΓΜΑ	υγρασία %
C	7%
1	28%
2	12%
3	7%

Πίνακας 4-1 Υγρασία δειγμάτων

Όπως φαίνεται παραπάνω (Πίνακας 4-1), το χωράφι 1 παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας. Η αυξημένη αυτή τιμή πιθανόν να οφείλεται σε πότισμα που έγινε κοντά στην περίοδο δειγματοληψίας. Στα υπόλοιπα δείγματα η τιμή κυμαίνεται στο 7% και 12%.

- **pH & EC**

Δείγμα	pH	EC
C	6,99	263
1	7,91	876
2	6,75	406
3	7,39	380

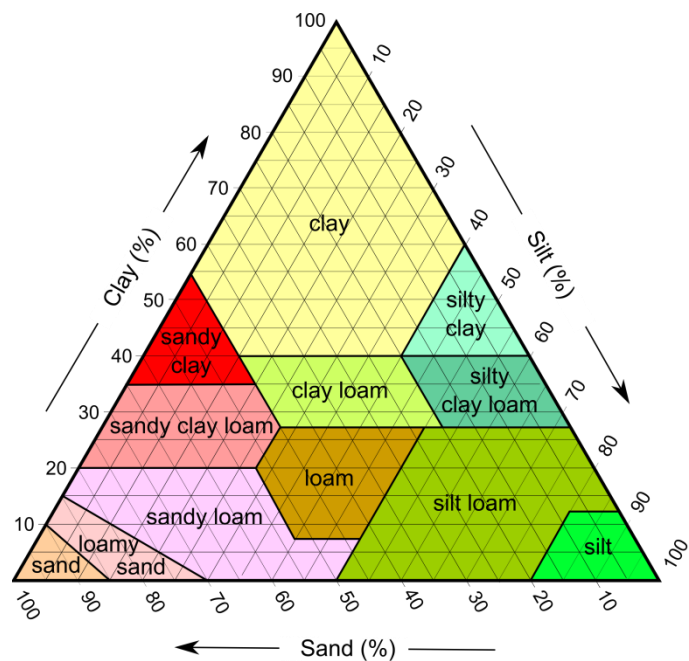
Πίνακας 4-2 pH & EC

Το pH του εδάφους καθώς και η ηλεκτρική αγωγιμότητα έχουν αυξητική τάση με την προσθήκη εδαφοβελτιωτικού, λόγω των αυξημένων ιόντων που προσφέρονται στο έδαφος.

- **Κοκκομετρία**

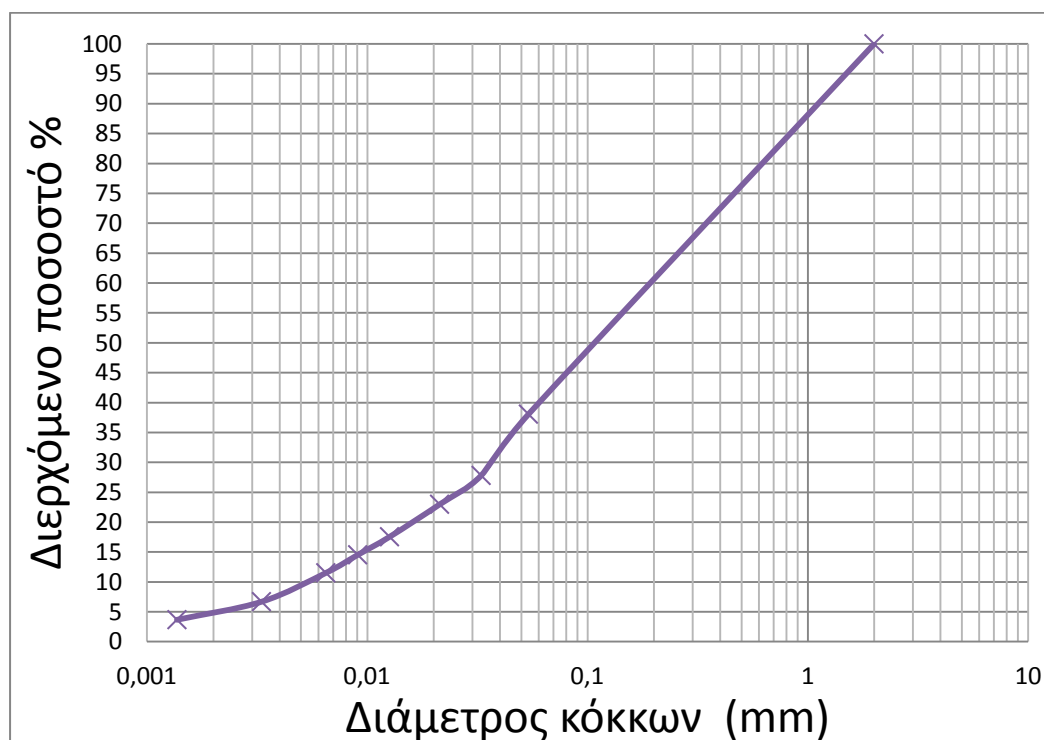
	Μ. Όρος	st. error
sand	63,3%	0,53
slit -clay	36,7%	0,53
clay	3,3%	0,27

Πίνακας 4-3 Κοκκομετρία



Εικόνα 4-11 Τύποι εδαφών σε σχέση με τα ποσοστά άμμου-ιλύος-αργίλου (USDA)

Σύμφωνα με την Εικόνα 4-11 και τον Πίνακα 4-3 με τα αποτελέσματα της κοκκομετρίας το έδαφος της περιοχής μελέτης είναι αμμώδης πυλός (sandy loam).



Γράφημα 4-1 Κοκκομετρία δείγματος <2mm

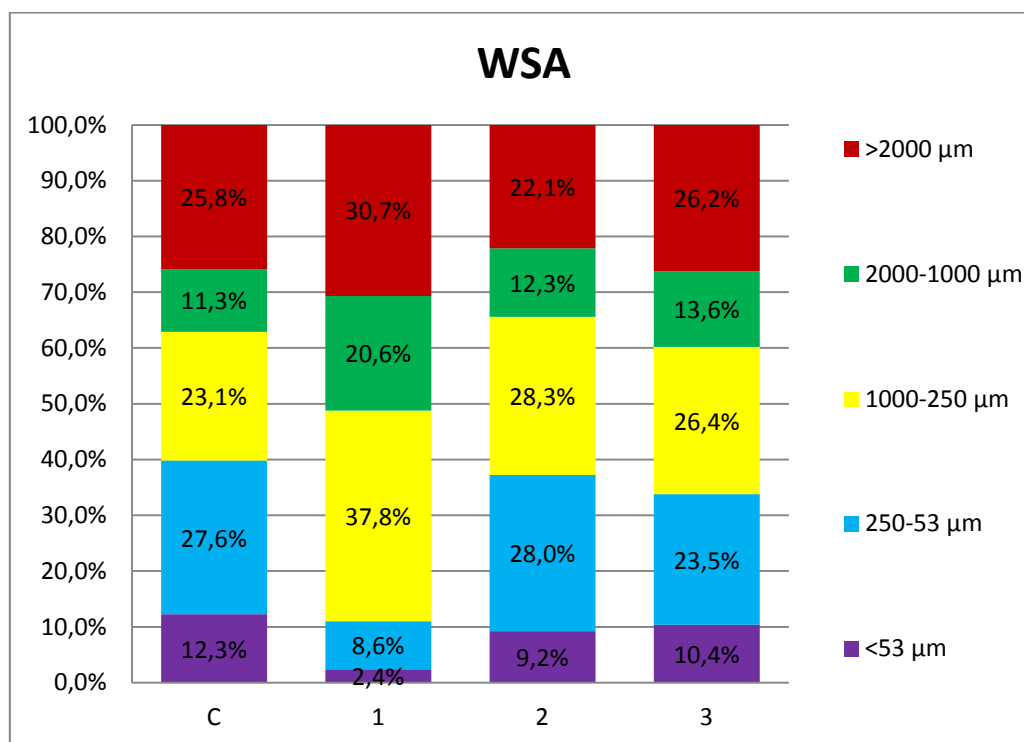
- **Συσσωματώματα**

WSA				
Κλάσεις (μm)	C	1	2	3
>2000 μm	25,8%	30,7%	22,1%	26,2%
2000-1000 μm	11,3%	20,6%	12,3%	13,6%
1000-250 μm	23,1%	37,8%	28,3%	26,4%
250-53 μm	27,6%	8,6%	28,0%	23,5%
<53 μm	12,3%	2,4%	9,2%	10,4%

Πίνακας 4-4 Ποσοστά συσσωματωμάτων

standard error	C	1	2	3
>2000 μm	3,5%	2,8%	2,3%	0,3%
2000-1000 μm	0,7%	1,1%	0,5%	0,3%
1000-250 μm	1,3%	2,8%	1,5%	0,5%
250-53 μm	1,0%	0,1%	1,0%	0,2%
<53 μm	0,5%	0,1%	0,3%	0,4%

Πίνακας 4-5 Τιμές τυπικού σφάλματος WSA



Γράφημα 4-2 Κατανομή των συσσωματωμάτων

Επακόλουθο της εισαγωγής compost στο έδαφος είναι η συσσωμάτωση που προκαλείτε σε αυτό. Όπως παρουσιάζεται στο Γράφημα 4-2 στο 1^ο χωράφι παρατηρείται μεγάλο ποσοστό του εδάφους στα μεγάλα κλάσματα σε αντίθεση με τα υπόλοιπα δείγματα που είναι πιο ισορροπημένα.

- **Διόρθωση Άμμου**

Calculations for silt-clay mass, %						
Aggregate Fraction	+2	+1	+250	+53	-53	sum
g sub-fraction/100g aggregate						
+2	79,0%	-	-	-	-	
+1	0,6%	75,6%	-	-	-	
+250	1,1%	1,3%	63,4%	-	-	
+53	2,9%	4,0%	7,8%	68,5%	-	
-53	16,5%	19,1%	28,8%	31,5%	-	
sand	83,5%	80,9%	71,2%	68,5%	-	
g sub fraction/100g bulk soil						
+2	20,42%	-	-	-	-	
+1	0,15%	8,51%	-	-	-	
+250	0,28%	0,15%	14,63%	-	-	
+53	0,74%	0,45%	1,80%	18,88%	-	
-53	4,26%	2,15%	6,66%	8,67%	12,25%	34,0%
g (s-c)/100g (s-c)						
s-c	12,5%	6,3%	19,6%	25,5%	36,0%	100,0%
S-C mass, %						
s-c AC3	38,5%					
s-c AC2	25,5%					
s-c AC1	36,0%					

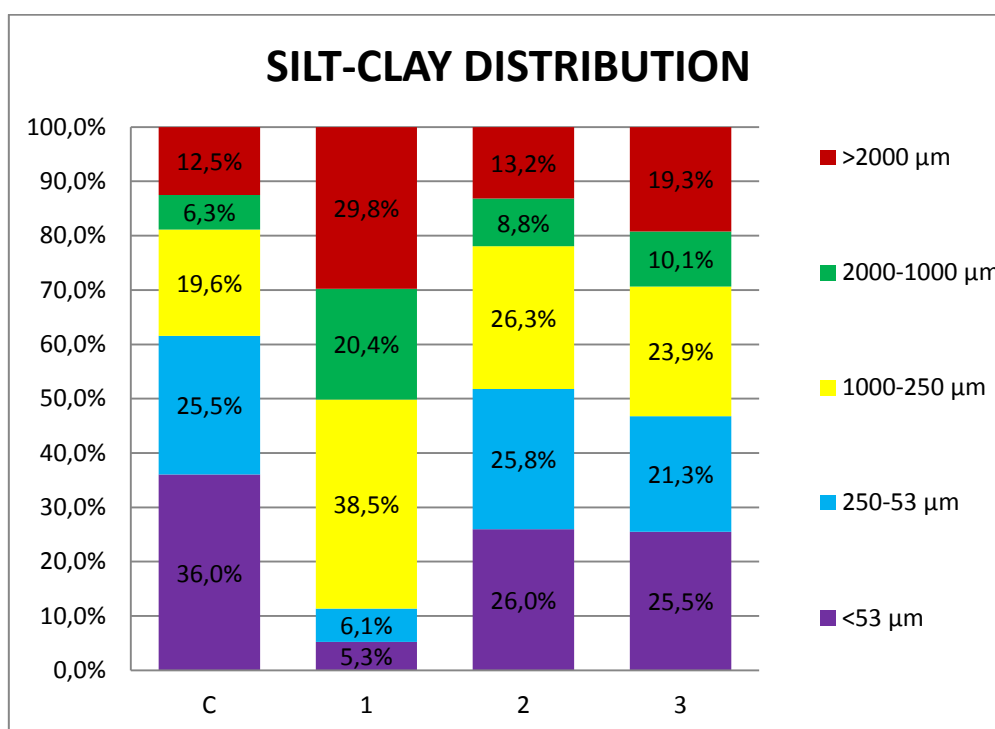
Πίνακας 4-6 Υπολογισμός μάζας ιλύος-αργίλου% στην περίπτωση του αρχικού δείγματος (C)

WSA SAND - CORRECTION				
Κλάσεις (μm)	C	1	2	3
>2000 μm	4,3%	13,6%	4,7%	7,8%
2000-1000 μm	2,2%	9,3%	3,1%	4,1%
1000-250 μm	6,7%	17,5%	9,3%	9,7%
250-53 μm	8,7%	2,8%	9,2%	8,6%
<53 μm	12,3%	2,4%	9,2%	10,4%

Πίνακας 4-7 συσσωματώματα με διόρθωση άμμου

standard error	C	1	2	3
>2000 μm	0,6%	2,8%	0,4%	0,1%
2000-1000 μm	0,1%	1,2%	0,2%	0,1%
1000-250 μm	0,4%	0,4%	0,7%	0,2%
250-53 μm	0,3%	0,2%	0,3%	0,1%
<53 μm	0,5%	0,1%	0,3%	0,4%

Πίνακας 4-8 Τυπικό σφάλμα στην διόρθωση άμμου στα WSA



Γράφημα 4-3 Κατανομή ιλύος-αργίλου στα κλάσματα

Εφόσον με την διόρθωση άμμου από κάθε κλάσμα αφαιρείται το ποσοστό άμμου, αυτό που παραμένει είναι το κλάσμα της ιλύος και αργίλου (silt-clay). Οπότε το Γράφημα 4-3 δίνει την κατανομή αυτού του κλάσματος στα 5 κλάσματα που έγινε η υγρή κοσκίνιση. Σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι γίνεται συσσώρευση του silt-clay στο 1^ο χωράφι όπου γίνεται εφαρμογή κάθε χρόνο ενώ αρκετά μικρότερη στα άλλα 2 χωράφια.

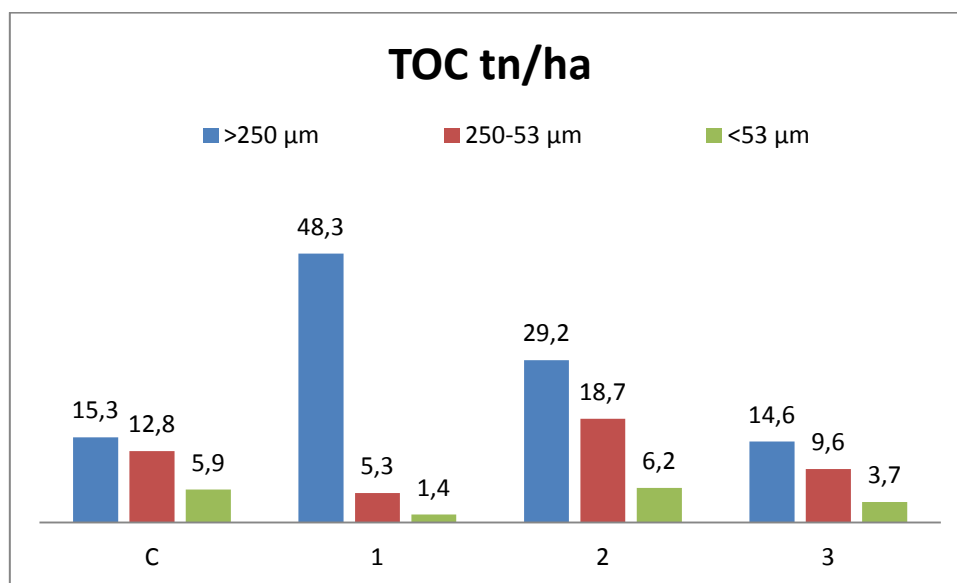
- **Μετρήσεις άνθρακα και αζώτου**

	TOC (g/kg)	TN (g/kg)	TC (g/kg)	TOC / TC	TOC / TN
C	39,41	3,11	47,90	0,82	12,69
1	60,57	3,68	78,62	0,77	16,45
2	57,81	4,24	69,76	0,83	13,63
3	31,28	2,62	34,33	0,91	11,92

Πίνακας 4-9 Μετρήσεις άνθρακα και αζώτου

TOC tn/ha	initial	10 years X2	8 years X2	3 years X2
	C	1	2	3
>250 μm	15,3	48,3	29,2	14,6
250-53 μm	12,8	5,3	18,7	9,6
<53 μm	5,9	1,4	6,2	3,7
total	34,1	55,1	54,1	27,9

Πίνακας 4-10 Τιμές οργανικού άνθρακα στα κλάσματα



Γράφημα 4-4 Τιμές οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (tn/ha)

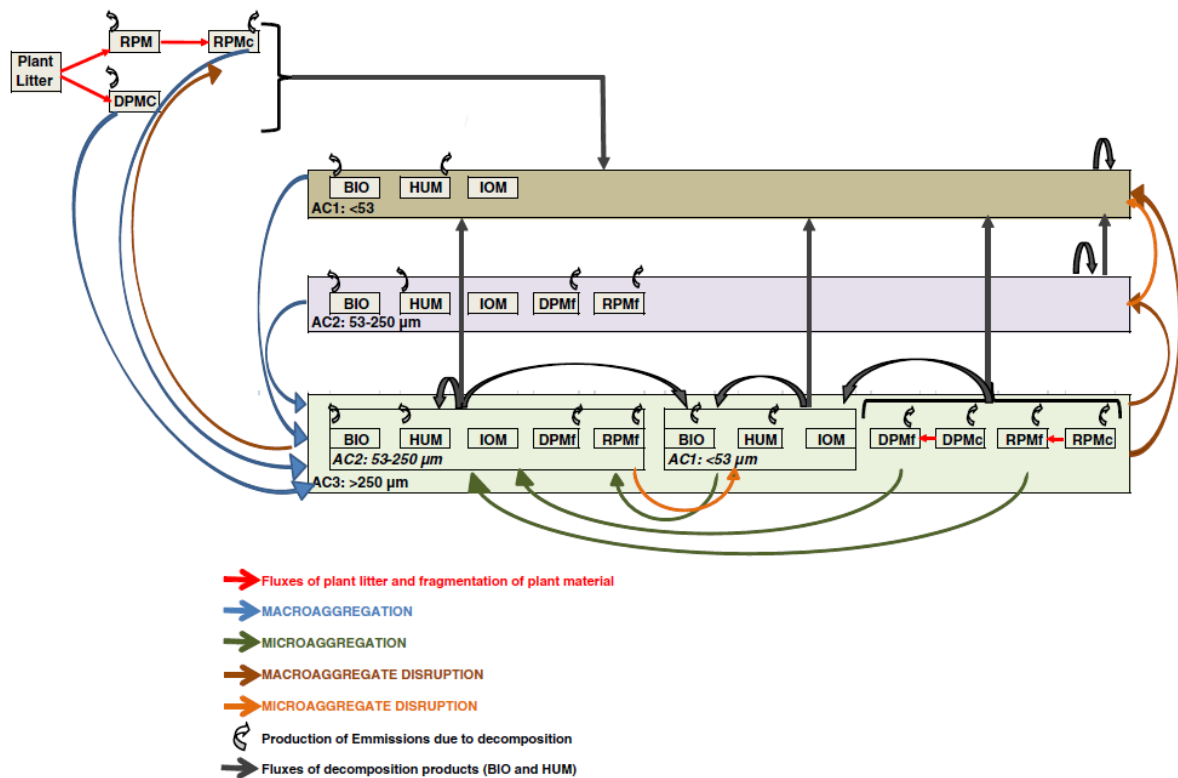
Τα αποτελέσματα της μέτρησης του οργανικού άνθρακα δείχνουν την συσσώρευση του στα μεγάλα κλάσματα στο 1^ο χωράφι, ενώ στα άλλα 2 λόγω της διάσπασης των

μάκρο-συσσωματωμάτων απελευθερώνονται τα μικρο-συσσωματώματα (AC2), τα οποία συγκρατούν τον οργανικό άνθρακα πλέον στο έδαφος.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι μετρήσεις στον Πίνακα 4-9 μετρήθηκαν με τη συσκευή Multi N/C 2100 analyticalgema οπότε έχουμε μετρήσεις TOC, TN & TC ενώ οι τιμές του Πίνακα 4-10 μετρήθηκαν με την μεθοδολογία στην παράγραφο 4.7 σε όλα τα επιμέρους κλάσματα.

5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την μοντελοποίηση των εδαφών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό CAST Model V1.0 , το οποίο είναι ένας συνδυασμός του ROTH-C και ενός μοντέλου συσσωματικής δομής του εδάφους (TUC HERS LAB, 2012). Αυτή η δουλειά είναι μέρος της διδακτορικής διατριβής της Φωτεινής Σταμάτη και ο κώδικας FORTAN δημιουργήθηκε από την Ντίνα Μοιρογιώργου.



Εικόνα 5-1 Σχέση μεταξύ των μεταβλητών του μοντέλου (Stamati et al., 2013a)

5.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

Αναγκαίες τιμές για το τρέξιμο του μοντέλου είναι:

1. Μηνιαίες κλιματικές τιμές (θερμοκρασία, βροχόπτωση & εξάτμιση)
2. Ποσό εισερχόμενου άνθρακα

3. Φυτοκάλυψη
4. Όργωμα
5. Χρήση γης
6. Βάθος εδαφικού δείγματος
7. Πυκνότητα εδάφους
8. Περιεκτικότητα σε άργιλο
9. Περιεκτικότητα σε άργιλο & ιλύ
10. DPM / RPM ratio

Παράμετροι στην περίπτωση της μελέτης στην περιοχή της Μηλιάς Χανίων:

- Βάθη δειγμάτων : 0 – 12 cm
- Πυκνότητα εδάφους : 1004 Kg / m³
- Compost: 121,2 m³/ha
- Περιεκτικότητα σε άργιλο υπολογίστηκε από την διαδικασία της κοκκομετρίας.
- Περιεκτικότητα σε άργιλο και ιλύ υπολογίστηκε από την διαδικασία της κοκκομετρίας και επιβεβαιώθηκε στην διαδικασία διόρθωσης άμμου.
- DPM / RPM ratio = 0.43

5.2 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Το επόμενο βήμα είναι να βρεθούν οι αρχικές συνθήκες και να εισαχθούν στο CAST Model. Το δείγμα από το πεδίο, στο οποίο δεν έγινε προσθήκη εδαφοβελτιωτικού, χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό την αρχικής κατάστασης των χωραφιών. Υπολογίστηκαν τα παρακάτω:

- ✓ Οργανικό υλικό εκτός των συσσωματωμάτων
- ✓ Οργανικό υλικό στα κλάσματα του εδάφους
- ✓ Περιεκτικότητα σε άργιλο & ιλύ στους διάφορους τύπους (AC3, AC2, AC1, AC1 IN AC3, AC2 IN AC3)
- ✓ Περιεκτικότητα σε άμμο (στο κλάσμα AC3 & AC2)

5.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Σκοπός της βαθμονόμησης είναι να ρυθμιστούν κατάλληλα οι παράμετροι του μοντέλου, ώστε οι τιμές που θα υπολογίζονται να συμπίπτουν με τις μετρήσιμες τιμές του εργαστηρίου.

RATE CONSTANTS (1/y)		
Fragmentation		RPM to RPMc
		50,0000
		RPMc to RPMf
		0,0000
		RPMc(AC3) to RPMf(AC3)
		0,1000
		DPMc(AC3) to DPMf(AC3)
		0,5000
Macroaggregation		RPMc
		1,2000
		DPMc
		0,8000
Microaggregation		k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini
		2,0000
		k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini
		2,0000
Decomposition	fresh plant input	DPM
		0,4000
		RPM
		0,1000
	AC3 Aggregate Type	RPMc
		0,1000
		RPMf
		0,1000
		RPMc within AC3
		0,1000
		RPMf within AC3
		0,1000
		DPMc within AC3
		0,5000
	AC2 Aggregate Type	DPMf within AC3
		0,5000
		BIO(AC1) within AC3
		0,0600
		HUM(AC1) within AC3
		0,0030
		BIO(AC2) within AC3
		0,0600
	AC2 Aggregate Type	HUM(AC2) within AC3
		0,0020
		RPMf(AC2) within AC3
		0,1000
	AC2 Aggregate Type	DPMf(AC2) within AC3
		0,1000
		BIO(AC2)
		0,0600
	AC2 Aggregate Type	HUM(AC2)
		0,0020
		RPMf(AC2)
		0,1000
	AC2 Aggregate Type	DPMf(AC2)
		0,1000
	AC2 Aggregate Type	BIO(AC1)
		0,0600
	AC2 Aggregate Type	HUM(AC1)
		0,0020

Πίνακας 5-1 Ρυθμοί αποδόμησης στην βαθμονόμηση του μοντέλου

Proportional contribution of the components in aggregation (fraction)		
Macroaggregation	RPMc	0,4500
	DPMc	0,3800
	AC1	0,0700
	AC2	0,1000
Microaggregation	RPMf within AC3	0,8000
	DPMf within AC3	0,0000
	AC1 within AC3	0,2000
Criterion for macro-aggregate (AC3) disruption (DPM within AC3), %	If there is no tilling	0,01800
	If there is tilling	0,03000
Criterion for micro-aggregate (AC2 within AC3) disruption (DPM+RPM in AC2 within AC3), %	If there is no tilling	0,01800
	If there is tilling	0,03000
Criterion for micro-aggregate disruption (AC3) (DPM+RPM in AC2), %	If there is no tilling	0,01800
	If there is tilling	0,03000

Πίνακας 5-2 Ποσοστιαία συνεισφορά των συστατικών στα συσσωματώματα

OTHER CALIBRATION PARAMETERS			
Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)	AC1	1,8000	fraction
	AC2	2,5000	fraction
	AC1 within AC3	0,4000	fraction
Particle density of the mineral phase (g/cm ³)	bd_m	2,2000	g/cm ³
Particle density of the organic matter (g/cm ³)	bd_om	0,7000	g/cm ³

Πίνακας 5-3 Άλλοι παράμετροι βαθμονόμησης

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρατίθενται στα παρακάτω γραφήματα, όπου γίνεται η απεικόνιση των χρονοσειρών (**γραμμές**) της κάθε παραμέτρου και οι μετρήσιμες εργαστηριακές τιμές (**σημεία Χ**).

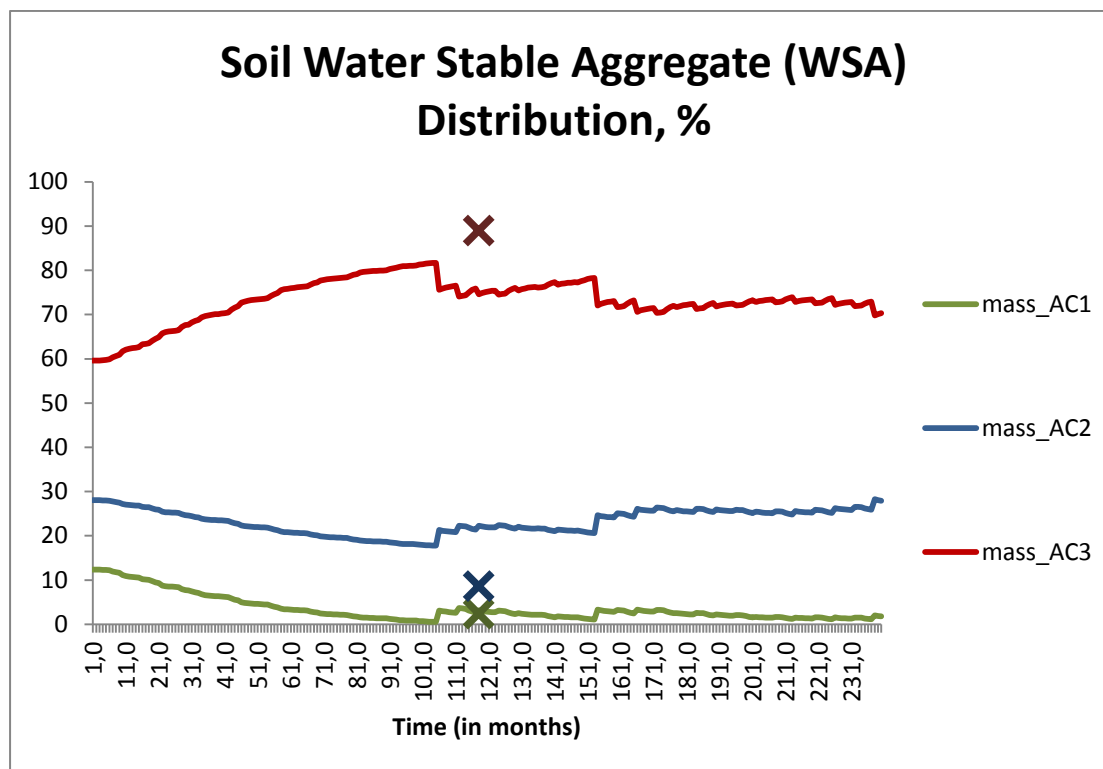
Τα κλάσματα του δείγματος που μελετήθηκαν είναι τρία :

- AC3 (>250μm)
- AC2 (250 – 53 μm) και
- AC1 (< 53 μm)

Τα αποτελέσματα μετά την βαθμονόμηση του μοντέλου είναι τα ακόλουθα:

6.1 1^ο ΧΩΡΑΦΙ

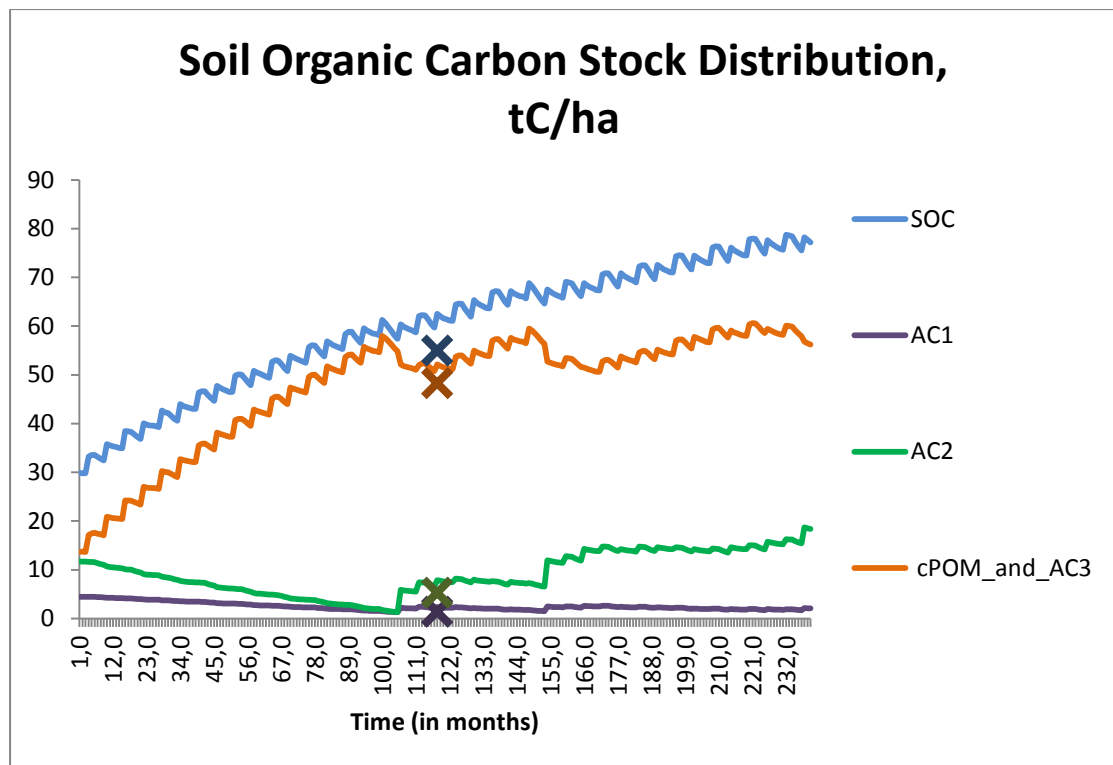
Όπως προαναφέρθηκε στο 1^ο χωράφι έγινε προσθήκη compost κάθε χρονιά, 2 φορές τον χρόνο (Απρίλιο & Νοέμβρη) , για τα τελευταία 10 χρόνια που έγινε και η προσομοίωση.



Γράφημα 6-1 Κατανομή WSA (1^ο χωράφι)

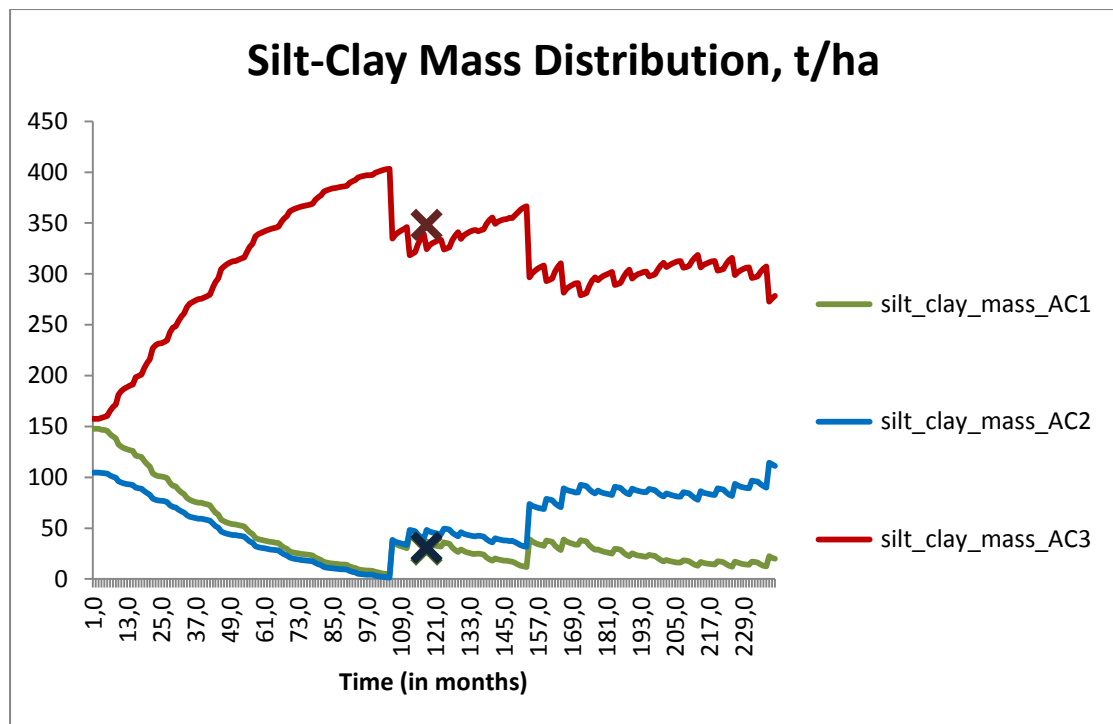
Το παραπάνω Γράφημα 6-1 δείχνει την κατανομή των συσσωματωμάτων στα κλάσματα του δείγματος και την εξέλιξη τους στον χρόνο.

Παρατηρείται ότι η προσθήκη του compost στο έδαφος αλλάζει την κατανομή βοηθώντας την δημιουργία των μακρο-συσσωματωμάτων.



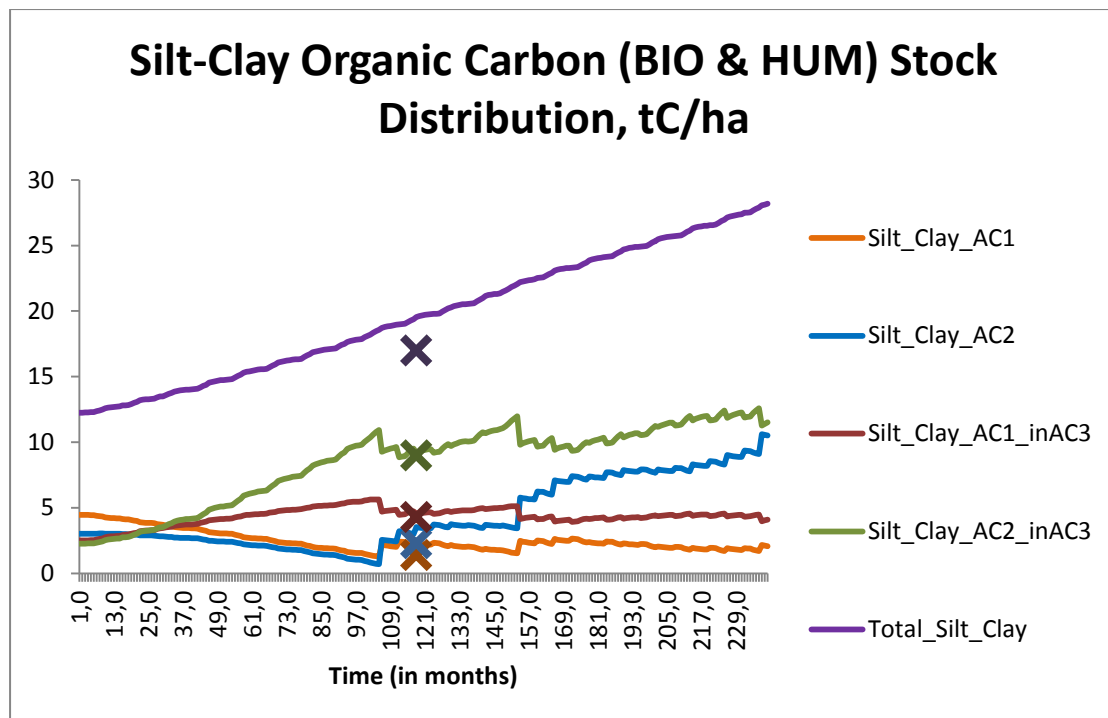
Γράφημα 6-2 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (1^ο χωράφι)

Το γράφημα κατανομής του οργανικού άνθρακα δείχνει την συσσώρευση του στο κλάσμα AC3 (>250μm). Τα συσσωματώματα προστατεύουν τον άνθρακα από την μικροβιακή δραστηριότητα οπότε και ανεβαίνουν τα επίπεδα του στο χωράφι.



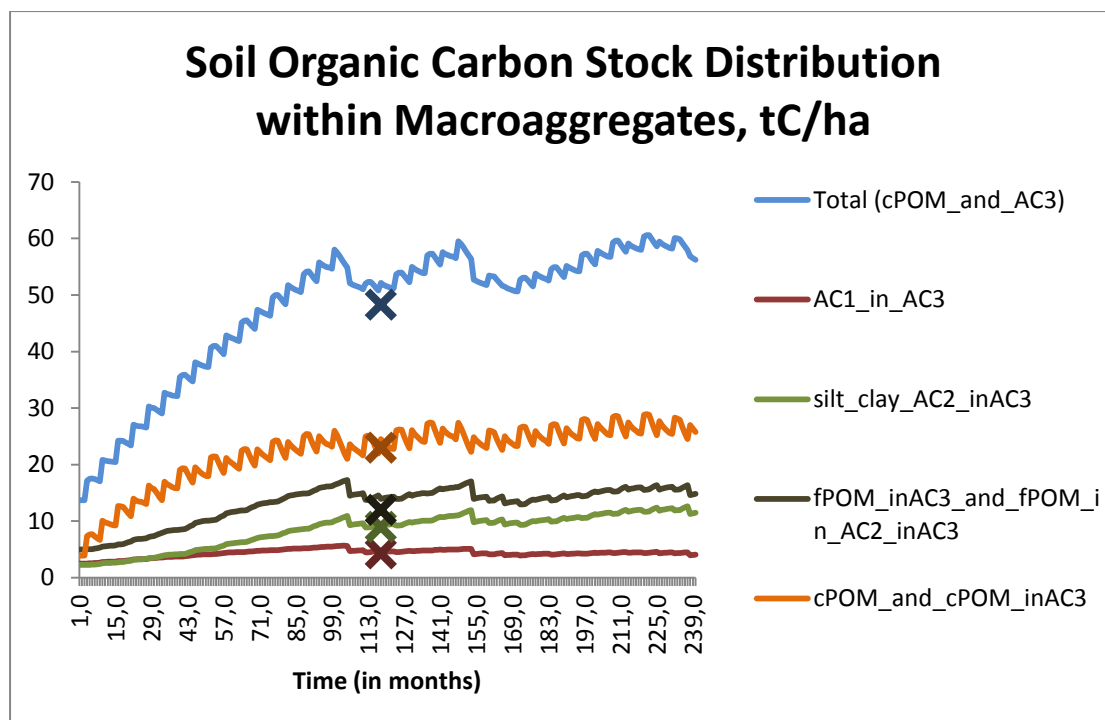
Γράφημα 6-3 Κατανομή αργίλου και ιλύος στα κλάσματα (1^ο χωράφι)

Λόγω της εισαγωγής άνθρακα και της δημιουργίας των συσσωματωμάτων παρατηρείται αύξηση του κλάσματος ιλύς-αργίλου (silt- clay) στο AC3 (>250 μm) καθώς μετέχει στη δημιουργία των μακρο- συσσωματωμάτων.



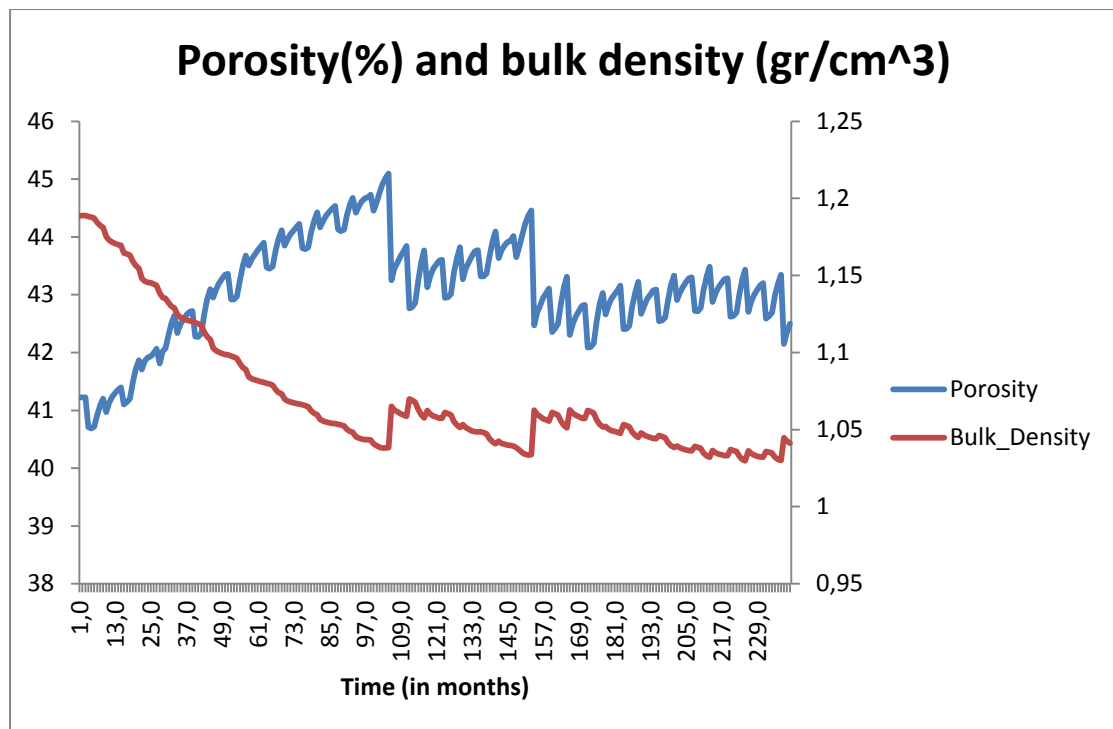
Γράφημα 6-4 Κατανομή οργανικού άνθρακα στην άργιλο και ιλύ (1^ο χωράφι)

Επακόλουθο της συσσώρευσης του κλάσματος ιλύος-αργίλου στα μακρο-συσσωματώματα, είναι η αύξηση του οργανικού άνθρακα στην ιλύ-άργιλο στα μεγαλύτερα κλάσματα (AC3 & AC2) όπως φαίνεται και παραπάνω (Γράφημα 6-2). Η εφαρμογή compost επίσης δίνει τον επιπλέον άνθρακα που μέσω της συσσωμάτωσης προστατεύεται και έτσι γίνεται δυνατή η συσσώρευση του (αύξηση του ολικού οργανικού άνθρακα στην ιλύ-άργιλο μωβ γραμμή).



Γράφημα 6-5 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα του AC3 (1^ο χωράφι)

Στο παραπάνω γράφημα παρατηρείτε η αύξηση του εδαφικού άνθρακα στα μακρο-συσσωματώματα καθώς με την παρουσία του compost αρχίζουν να δημιουργούνται. Μέσα λοιπόν σε αυτά αρχίζουν να δημιουργούνται και τα μικρο-συσσωματώματα οπότε και αυξάνονται οι τιμές των κλασμάτων που τα αφορούν (AC2) .

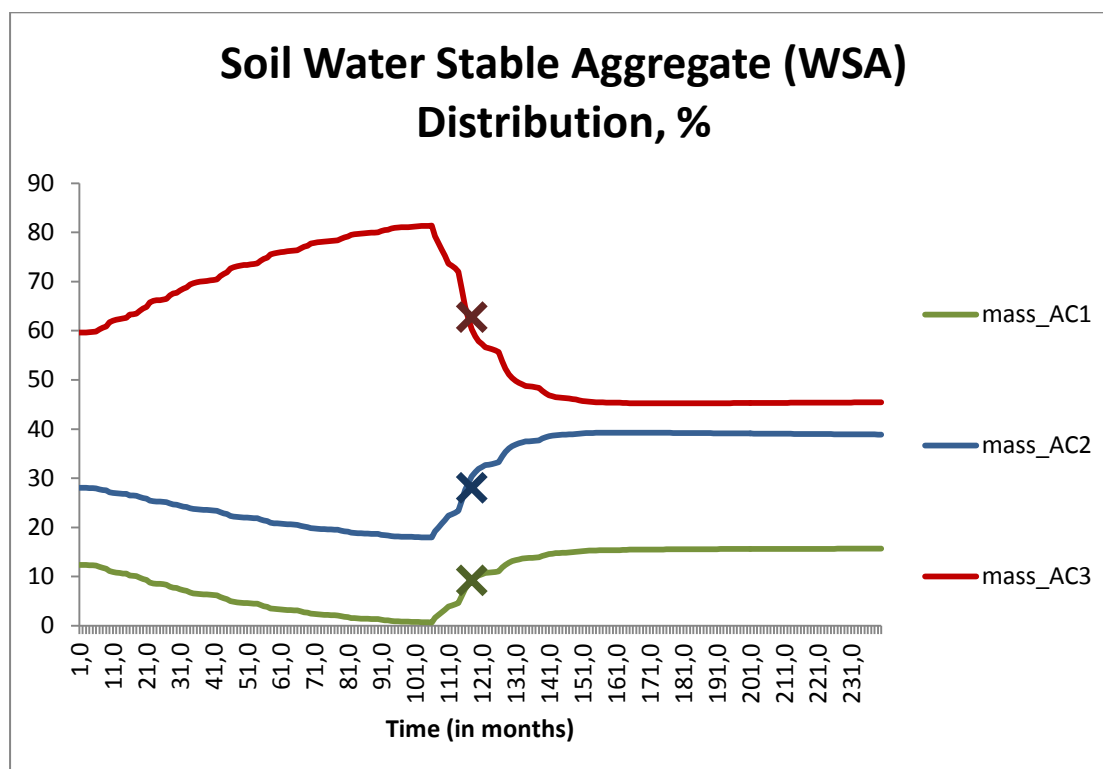


Γράφημα 6-6 Πορώδες και πυκνότητα εδάφους (1^ο χωράφι)

Με τον σχηματισμό των συσσωματωμάτων είναι εμφανές ότι η πυκνότητα του εδάφους θα μειωθεί και θα υπάρξει αύξηση του πορώδους λόγω της δημιουργίας διακένων. Σημαντικός παράγοντας είναι και η χαμηλή πυκνότητα του compost όπου με την ανάμιξη επηρεάζει την τιμή του εδάφους.

6.2 2^ο ΧΩΡΑΦΙ

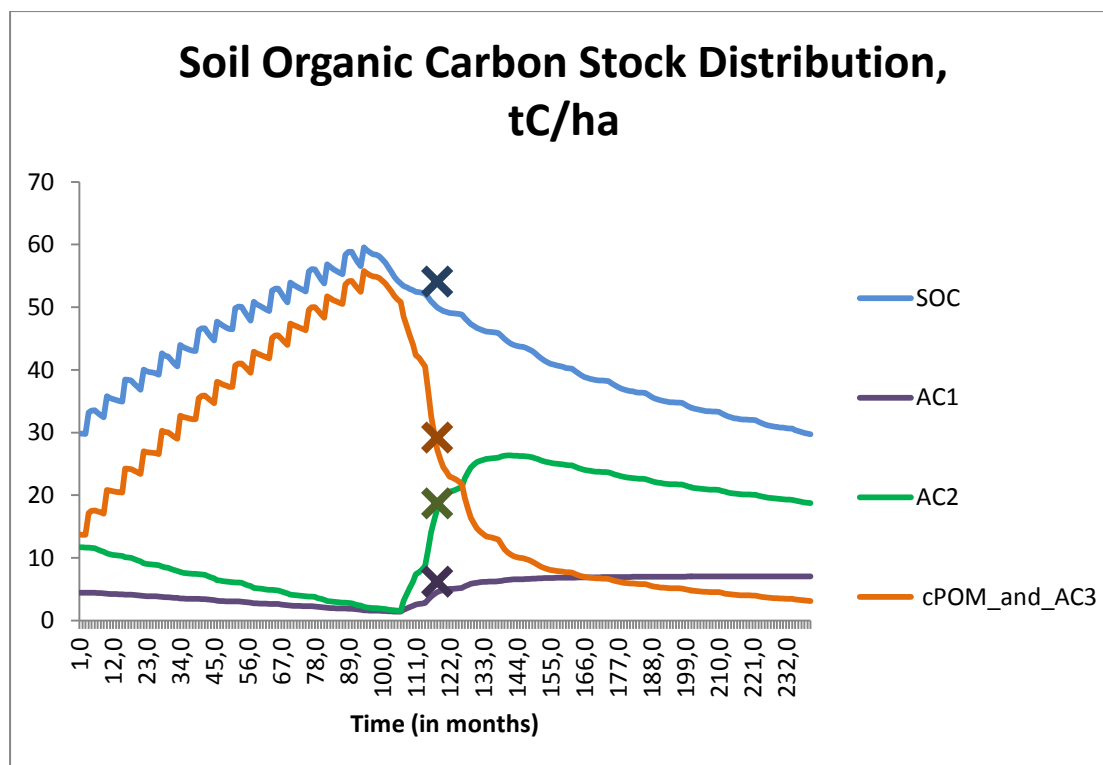
Σε αυτό το χωράφι έγινε προσθήκη compost στα πρώτα 8 από τα 10 χρόνια με τα 2 τελευταία σε κατάσταση αγρανάπαυσης.



Γράφημα 6-7 Κατανομή WSA (2^ο χωράφι)

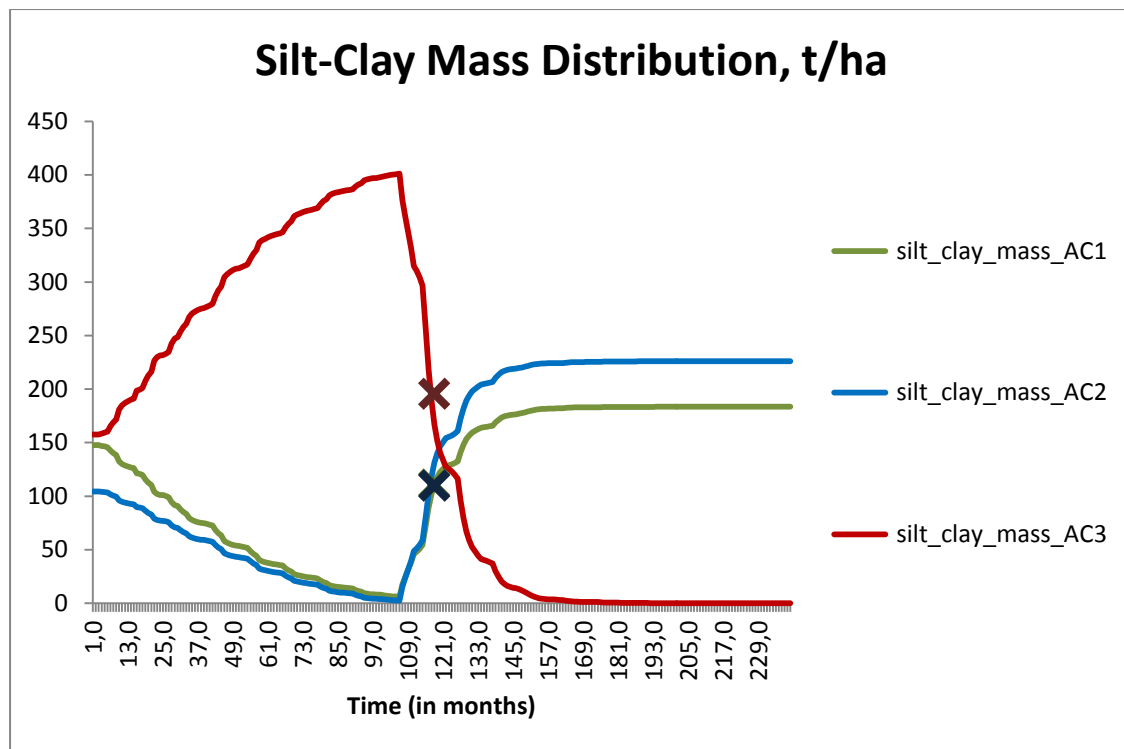
Τα πρώτα 8 χρόνια παρατηρείται αύξηση του κλάσματος AC3 (>250 μm) καθώς, όπως και στο Γράφημα 6-1, το compost βοηθά στην δημιουργία των συσσωματωμάτων.

Στην συνέχεια η διακοπή της προσθήκης εδαφοβελτιωτικού προκαλεί την καταστροφή των μακρο-συσσωματωμάτων και την απελευθέρωση των μικρο-συσσωματωμάτων και σωματιδίων μεγέθους μικρότερου των 53 μm (κλάσμα AC1) έχοντας σαν αποτέλεσμα στην αύξηση των κλασμάτων AC2 & AC1 .



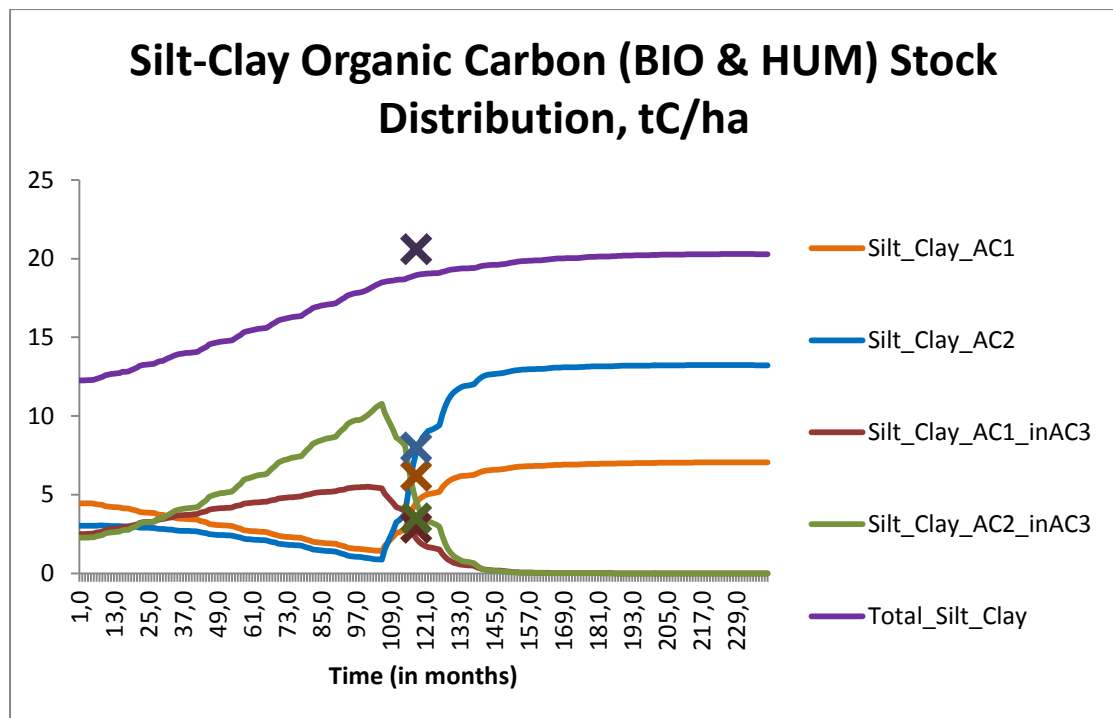
Γράφημα 6-8 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (2^ο χωράφι)

Στο παραπάνω διάγραμμα έχουμε την ίδια αύξηση σε εδαφικό άνθρακα τα 8 πρώτα χρόνια όπως παρατηρήθηκε και στο 1^ο χωράφι καθώς έχουν την ίδια πρακτική διαχείρισης (4 tn C/ha). Μετά τον 8^ο χρόνο, όπου διακόπτεται η εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού, τα μακρο-συσσωματώματα δημιουργούνται με πολύ χαμηλότερο ρυθμό από ότι σπάνε και απελευθερώνουν τα μικρο-συσσωματώματα (ροή άνθρακα προς το κλάσμα AC2) οπότε έχουμε έκθεση του οργανικού άνθρακα ο οποίος και αρχίζει να αποικοδομείται μέσω της μικροβιακής δραστηριότητας.



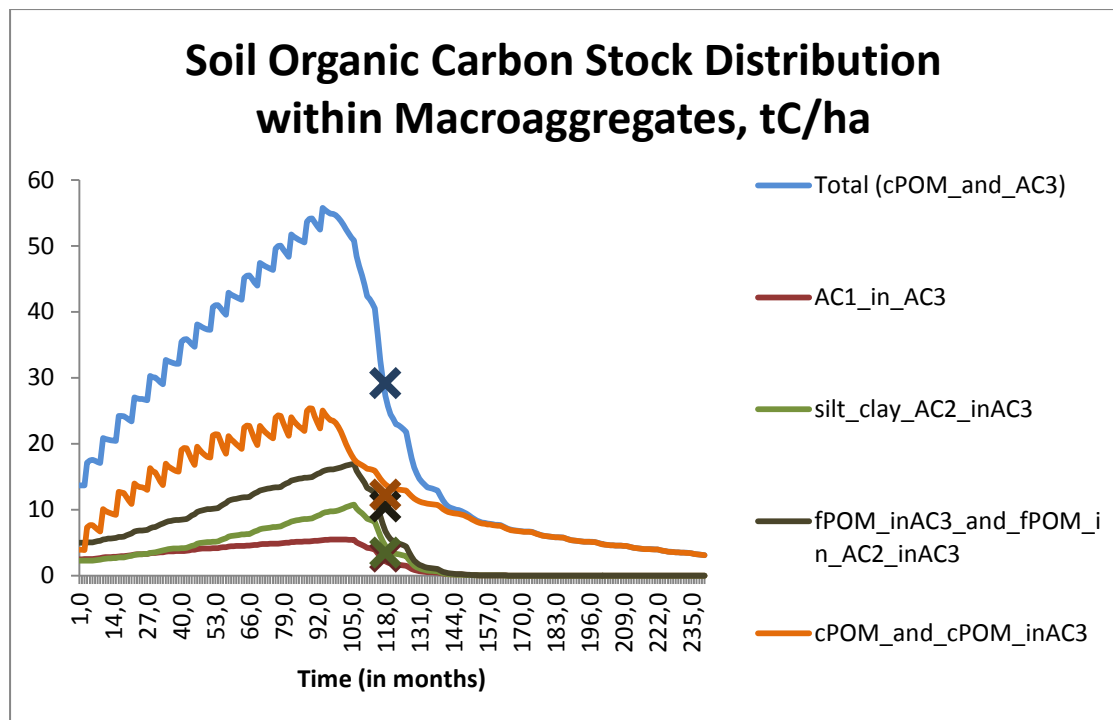
Γράφημα 6-9 Κατανομή αργίλου και ιλύος στα κλάσματα (2^ο χωράφι)

Αυτή λοιπόν η διάσπαση έχει ως αποτέλεσμα να αρχίζει η συσσώρευση της ιλύος & αργίλου από τα μεγαλύτερα σε μέγεθος κλάσματα (AC3) σε μικρότερα. Όπως δείχνει και το παραπάνω διάγραμμα η μάζα της ιλύος & αργίλου αυξάνεται στα AC2 & AC1 ακολουθώντας την τάση της αύξησης αυτών των κλασμάτων στο Γράφημα 6-7.



Γράφημα 6-10 Κατανομή οργανικού άνθρακα στην άργιλο και ιλύ (2^ο χωράφι)

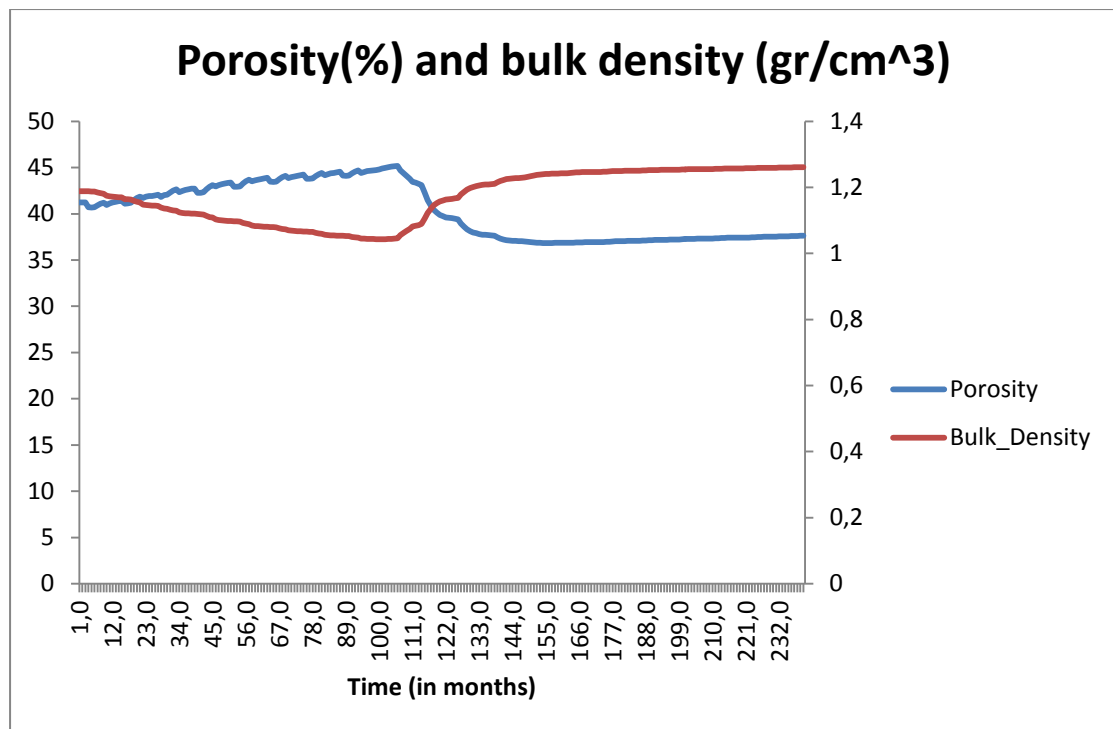
Σε αυτό το χωράφι υπάρχει αυξητική τάση του άνθρακα μέχρι το σημείο που διακόπτεται η εισαγωγή άνθρακα οπότε και σταθεροποιείται γύρω στους 20 tn C/ha. Σημαντική παρατήρηση είναι η αλλαγή της κατανομής του οργανικού άνθρακα, καθώς υπάρχει μείωση στο AC3 και αύξηση στα AC2 & AC1 ακολουθώντας την ροή της ιλύος & αργίλου (silt-clay) όπως φαίνεται στο Γράφημα 6-9.



Γράφημα 6-11 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα του AC3 (2^ο χωράφι)

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως με την διακοπή εφαρμογής compost μειώνεται σημαντικά ο διαθέσιμος άνθρακας που υπάρχει στο έδαφος και δυσχαιρένεται η δημιουργία των μακρο-συσσωματωμάτων. Ως συνέπεια αυτού είναι η διάσπαση των υπάρχοντων μακρο-συσσωματωμάτων και η απελευθέρωση των μικρο-συσσωματωμάτων.

Αυτό φαίνεται στο παραπάνω γράφημα όπου ο οργανικός άνθρακας στην ιλύ-άργιλο στα μακρο-συσσωματώματα και στα μικρο-συσσωματώματα (sc_in AC3 & sc_in AC2_in AC3) μειώνεται ως συνέπεια της διάσπασης του AC3. Τελικά εφόσον διασπαστούν, ο άνθρακας μεταφέρεται στα μικρότερα κλάσματα όπως φαίνεται στο Γράφημα 6-8.

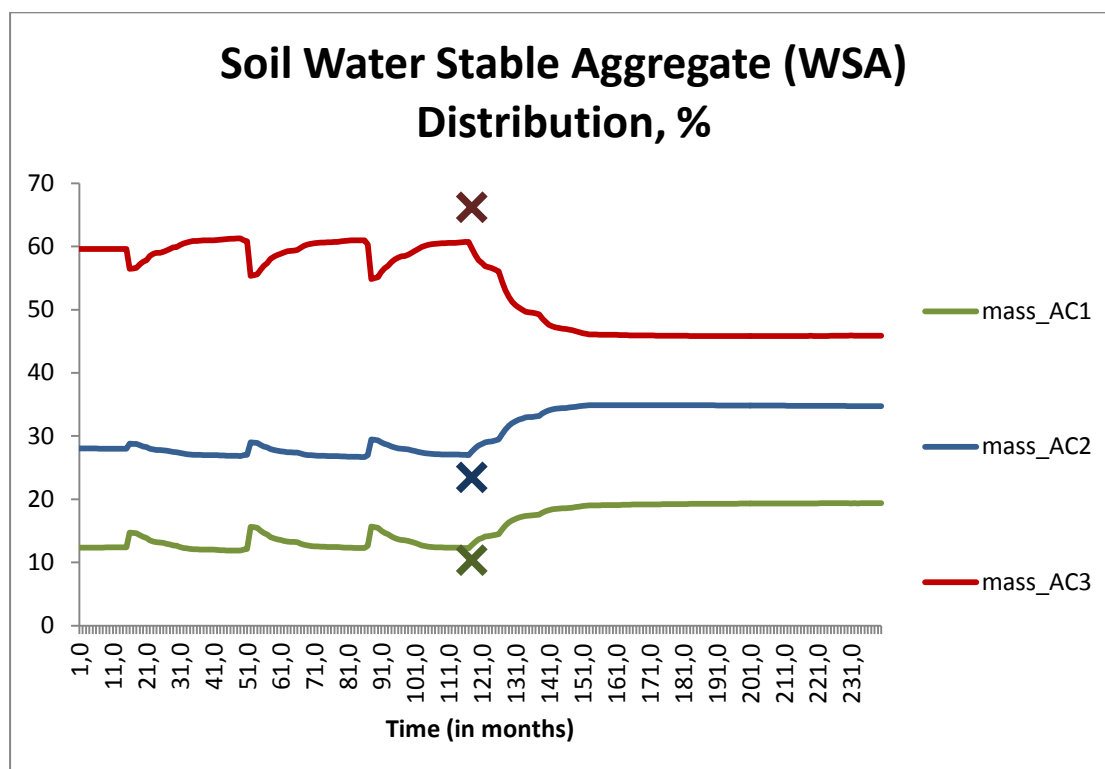


Γράφημα 6-12 Πορώδες και πυκνότητα εδάφους (2^ο χωράφι)

Όπως και στο Γράφημα 6-6, στα χρόνια εφαρμογής (0-8 χρόνια) η πυκνότητα έχει καθοδική πορεία και αντίθετα το πορώδες αυξάνεται. Μετά την διακοπή της εφαρμογής οι τάσεις αντιστρέφονται, επακόλουθο της διάσπασης των μακρο-συσσωματωμάτων και της απελευθέρωσης μικρότερων σε μέγεθος σωματιδίων.

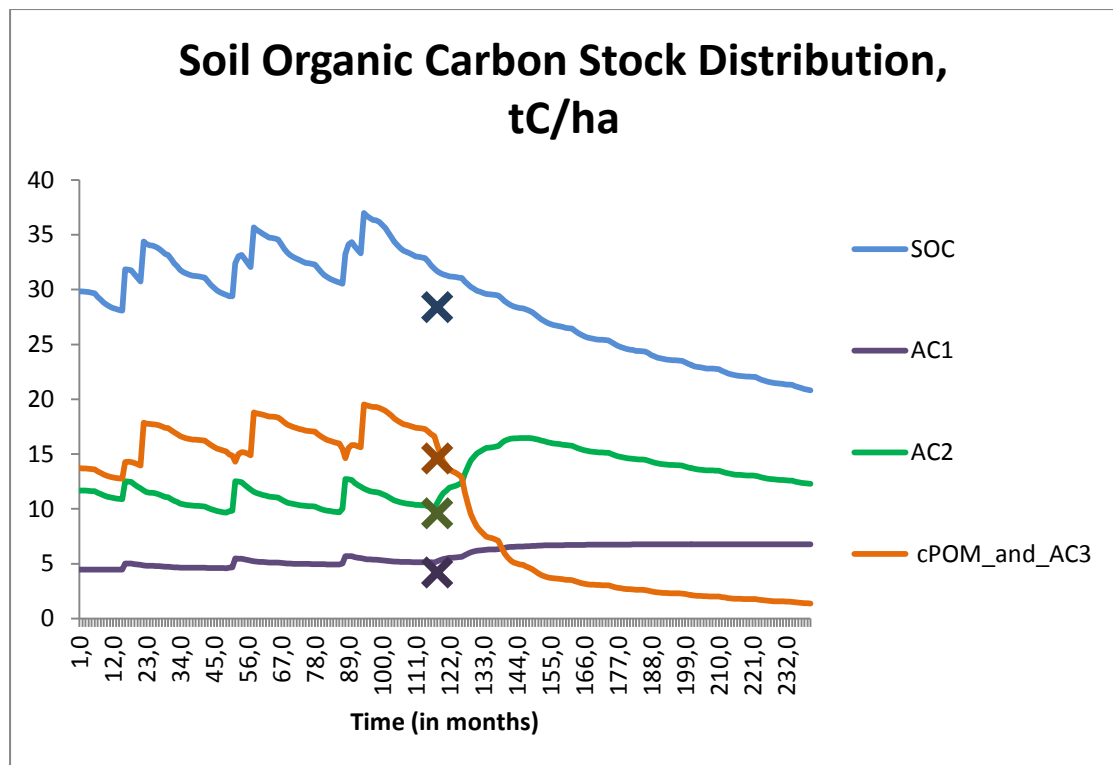
6.3 3^ο ΧΩΡΑΦΙ

Στο 3^ο χωράφι έχουν γίνει εφαρμογές compost ανά 3 χρόνια (Νοέμβρη & Απρίλιο), πιο συγκεκριμένα τον 2^ο ,5^ο και 8^ο χρόνο.



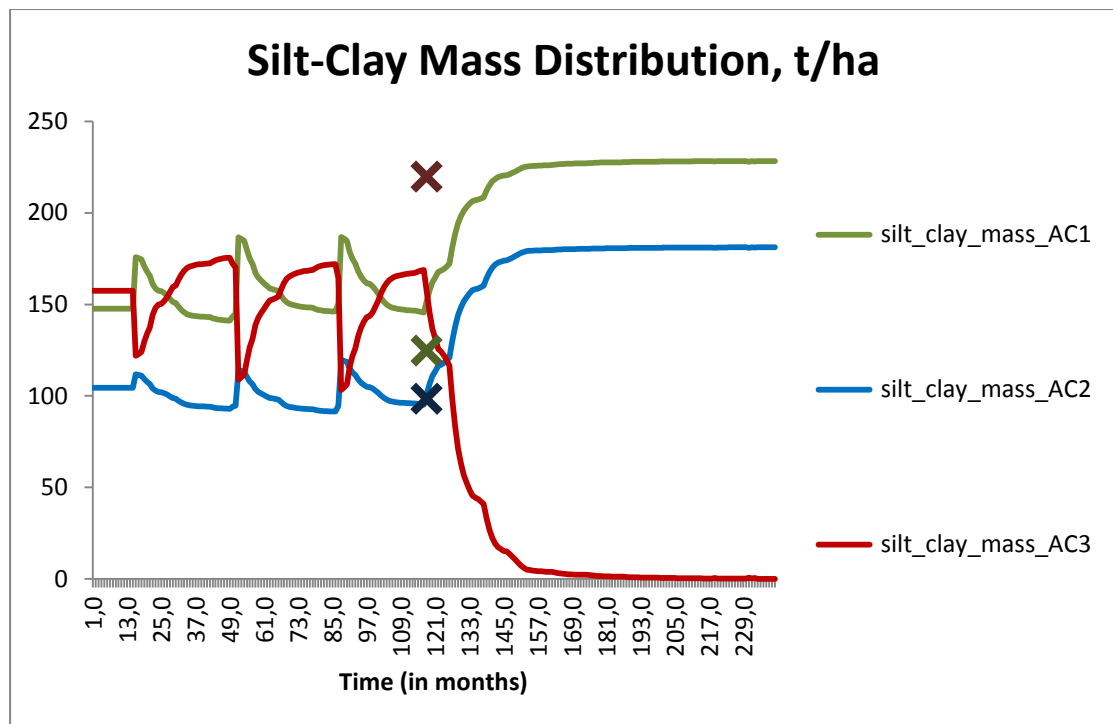
Γράφημα 6-13 Κατανομή WSA (3^ο χωράφι)

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως επηρεάζεται η κατανομή των κλασμάτων AC3, AC2 και AC1 με την προσθήκη compost καθώς αρχίζει η διαδικασία της συσσωμάτωσης μέχρι την στιγμή που εξαντλείται ο διαθέσιμος άνθρακας και τα μακρο-συσσωματώματα (AC3) διασπώνται δημιουργώντας μια ροή μάζας προς τα μικρότερα.



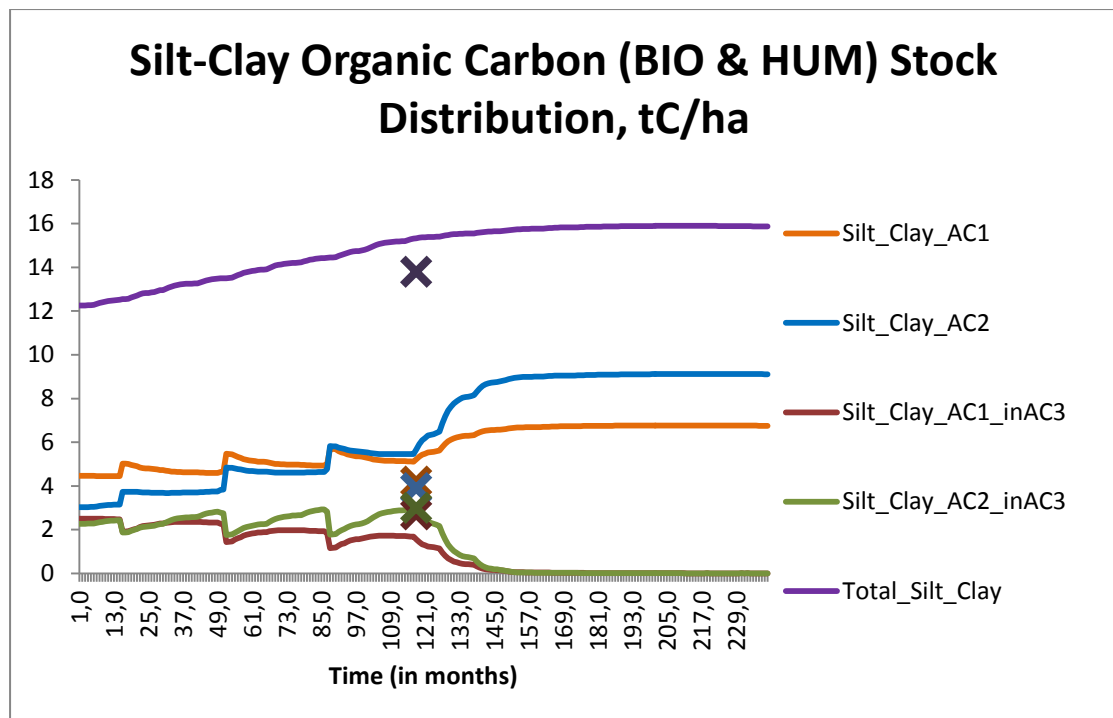
Γράφημα 6-14 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (3^ο χωράφι)

Παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα αύξηση του οργανικού άνθρακα του εδάφους την χρονική περίοδο μετά την εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού και κατόπιν με την διάσπαση του AC3 τροφοδότηση των άλλων κλασμάτων με άνθρακα.



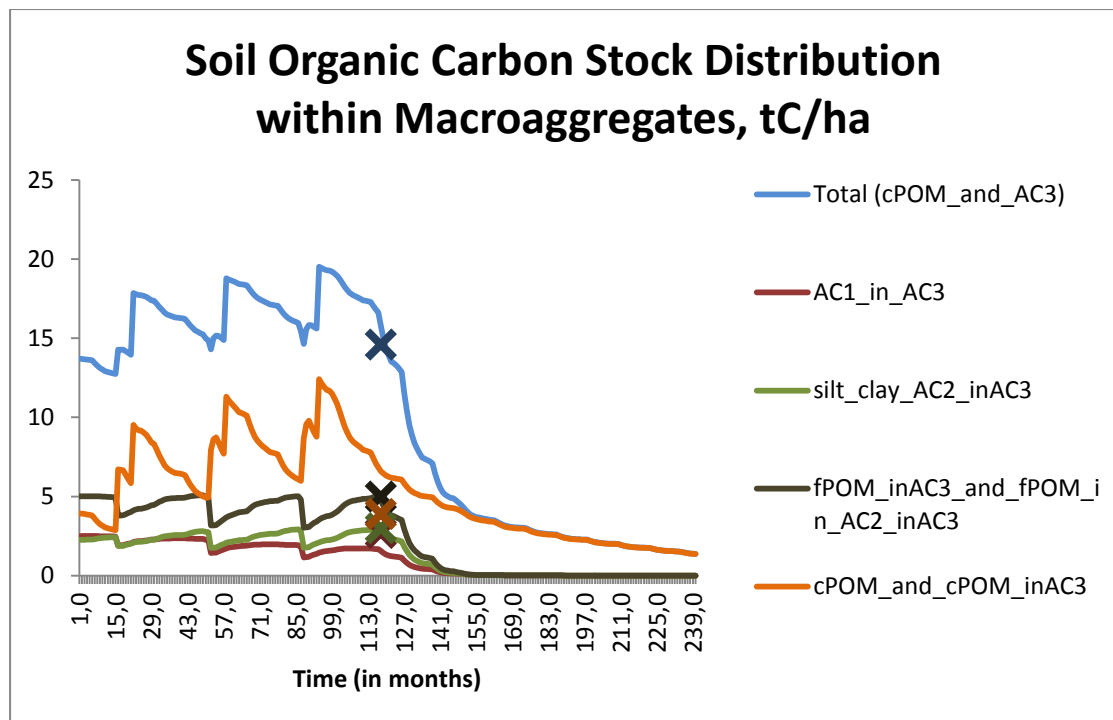
Γράφημα 6-15 Κατανομή αργίλου και ιλύος στα κλάσματα (3^ο χωράφι)

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η μεταφορά μάζας που γίνεται κατά την συσσωμάτωση και την διάσπαση. Παρουσία άνθρακα έχουμε συσσωμάτωση όπου μάζα ιλύος και αργίλου (silt-clay) από τα κλάσματα AC2 (250 -53 μm) και AC1 (<53 μm) εγκλωβίζεται στα μάκρο-συσσωματώματα και κατά την διάσπαση απελευθερώνονται τα μικρο-συσσωματώματα.



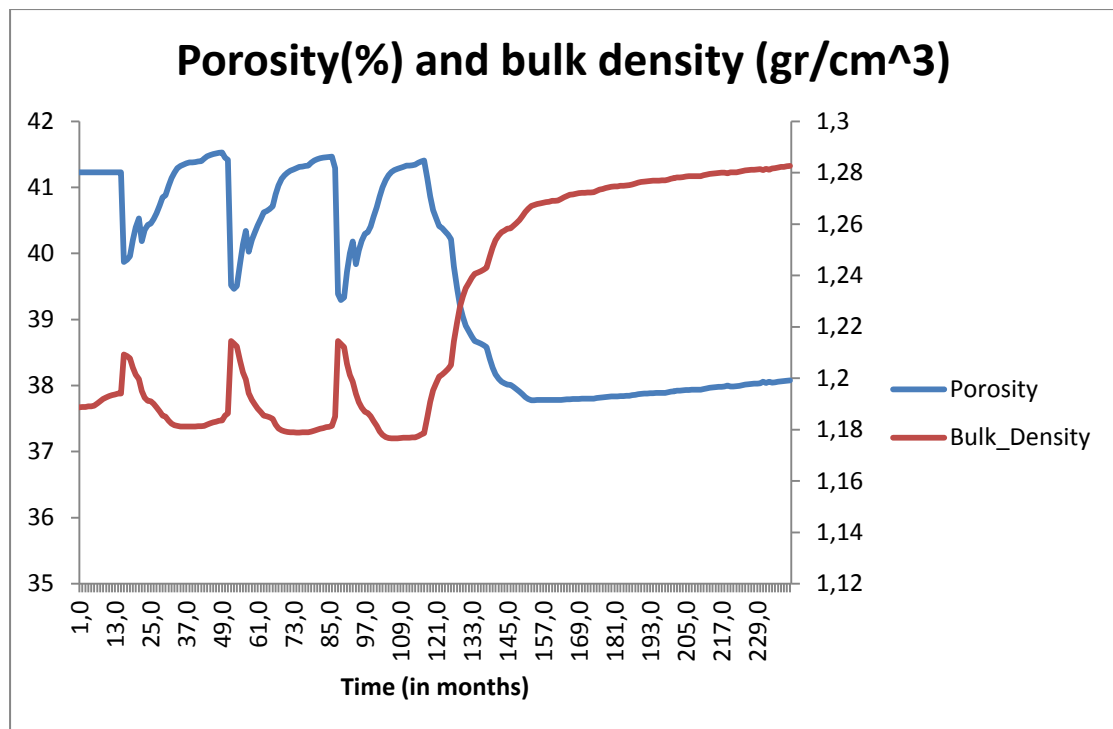
Γράφημα 6-16 Κατανομή οργανικού άνθρακα στην άργιλο και ιλύ (3^ο χωράφι)

Κατά την προσθήκη compost υπάρχει αύξηση του οργανικού άνθρακα στο silt-clay και μια σταθερή κατάσταση στην επιμέρους κατανομή. Μετά τον 8^ο χρόνο που σταματά η εφαρμογή, η μάζα της ιλύος και της αργίλου μέσω της διάσπασης μεταφέρεται στα μικρότερα κλάσματα (από AC3 σε AC2 και AC1).



Γράφημα 6-17 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα του AC3 (3^ο χωράφι)

Παρόμοια κατάσταση με το 2^ο χωράφι (Γράφημα 6-11) καθώς με την συσσωμάτωση έχουμε τη δημιουργία μικρο-συσσωματωμάτων και συσσώρευση ιλύος-αργίλου μέσα στα μάκρο-συσσωματώματα. Μετά τον 8^ο χρόνο παρατηρείται κατάρρευση του κλάσματος AC3 και απελευθέρωση των AC2 και AC1 οπότε και παραμένει το CPOM ως ποσό του άνθρακα.



Γράφημα 6-18 Πορώδες και πυκνότητα εδάφους (3^ο χωράφι)

Λόγω της μεγαλύτερης χρονικής περιόδου εφαρμογής του εδαφοβελτιωτικού (ανά 3 χρόνια) παρατηρούνται διακυμάνσεις στο πορώδες και στην πυκνότητα. Κατά την προσθήκη εδαφοβελτιωτικού αρχίζει η συσσωμάτωση οπότε αυξάνεται το πορώδες και μειώνεται η πυκνότητα αλλά με την εξάντληση των συστατικών αρχίζει η διάσπαση οπότε αντιστρέφεται η τάση των δύο μεταβλητών έως ότου ξαναγίνει εφαρμογή compost.

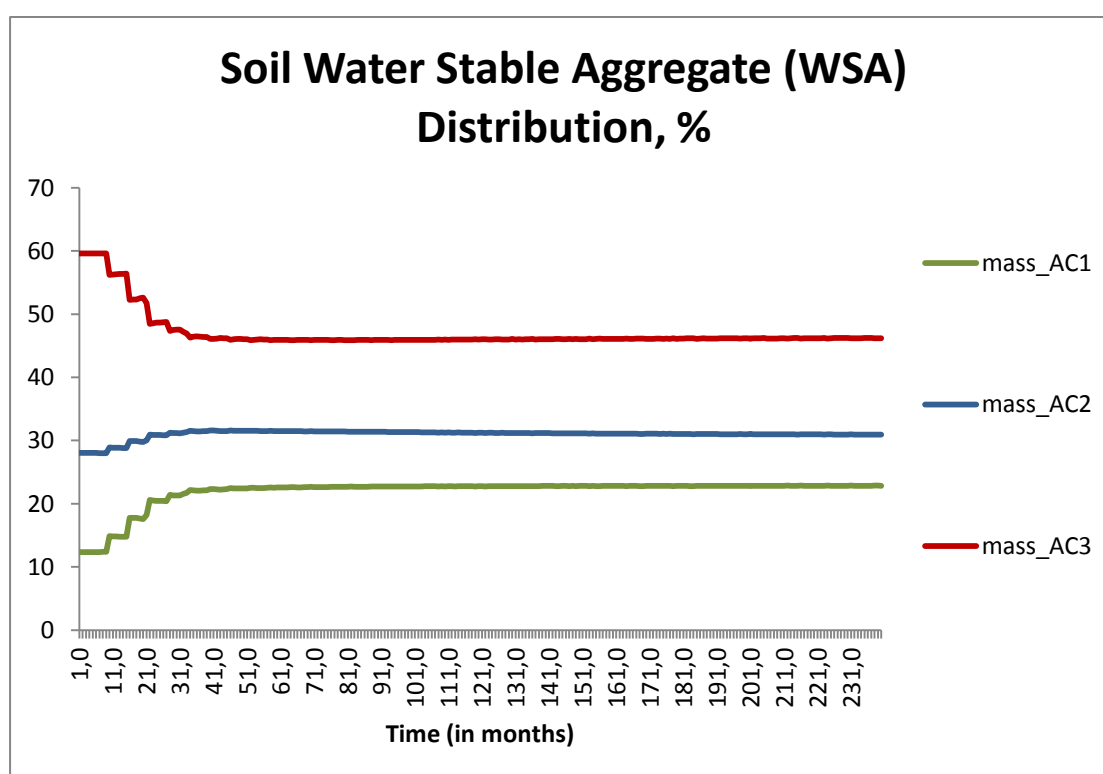
6.4 ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Εφόσον έχει πλέον μοντελοποιηθεί το έδαφος των χωραφιών δίνεται η δυνατότητα να βρεθεί η κατάσταση του εδάφους εάν δεν είχε εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού όπως και την ποσότητα εδαφοβελτιωτικού για την διατήρηση ή επαναφορά των χαρακτηριστικών του εδάφους.

6.4.1 ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΧΩΡΙΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΕΔΑΦΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΟΥ

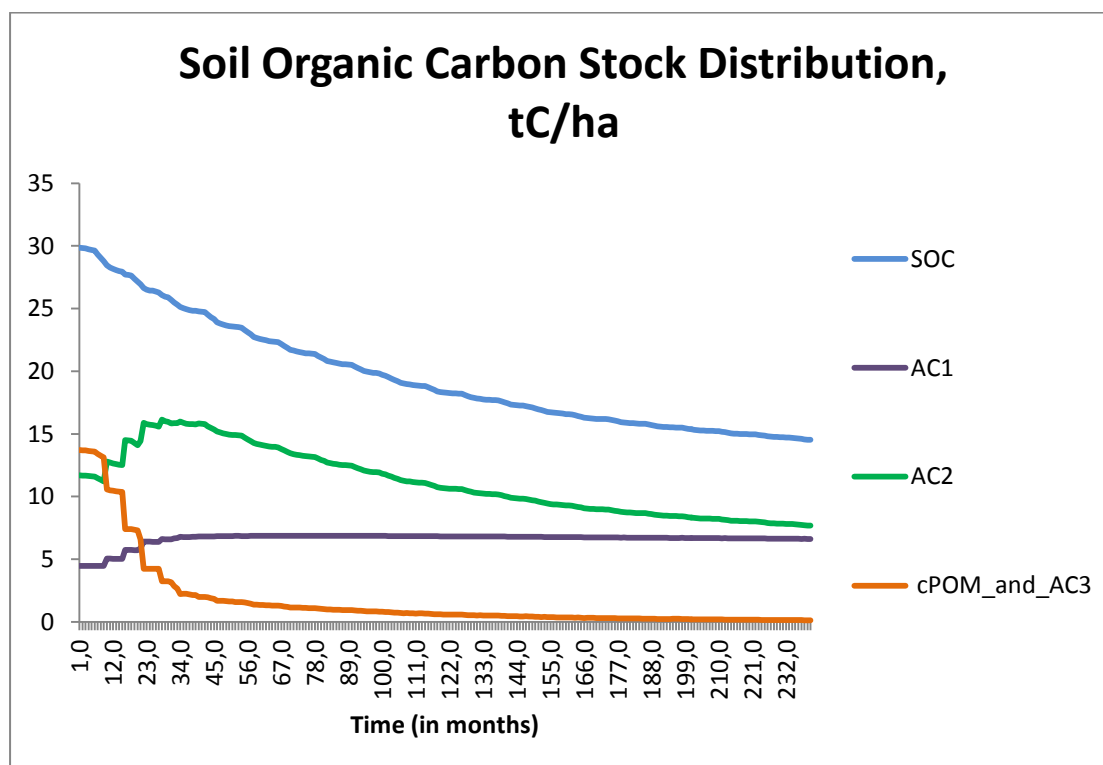
Με βάση το μοντελοποιημένο έδαφος πλέον, γίνεται το τρέξιμο του προγράμματος σε καλλιέργεια εδάφους χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού στα δεδομένα εισαγωγής.

Παρακάτω παραθέτονται τα γραφήματα κατανομής των συσσωματωμάτων καθώς και του εδαφικού οργανικού άνθρακα στα τρία κλάσματα που μελετώνται.



Γράφημα 6-19 Κατανομή WSA σε χωράφι χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού

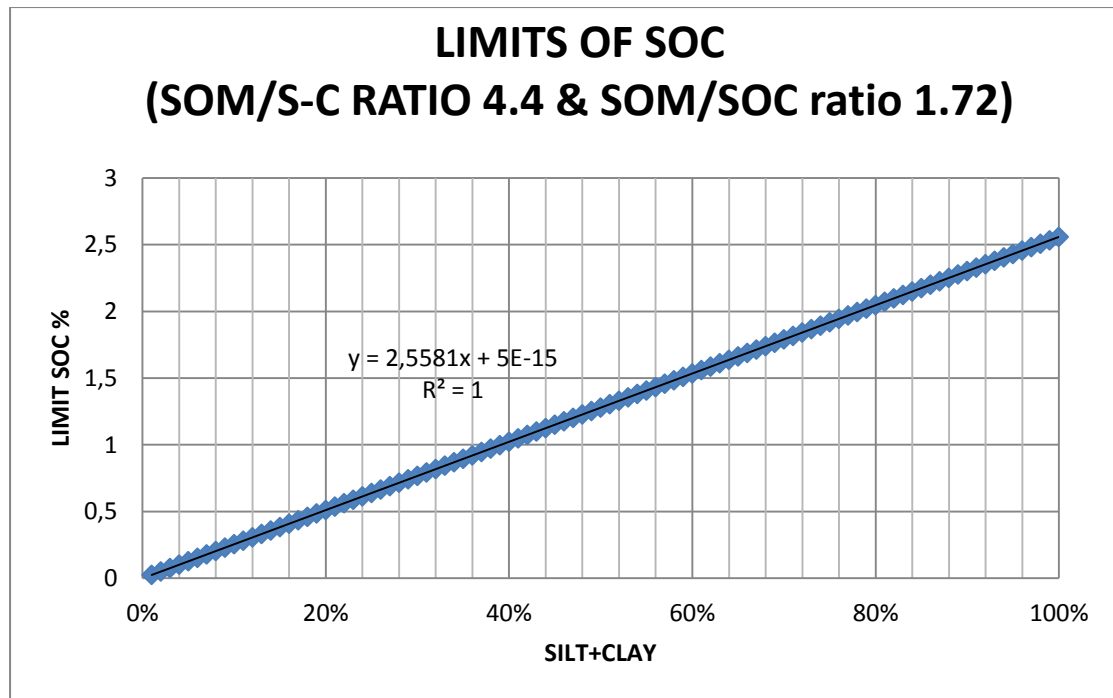
Με την καλλιέργεια του εδάφους και το όργωμα, χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού παρατηρείται ότι τα μακρο-συσσωματώματα διασπώνται αρκετά γρήγορα (περίπου 3 χρόνια) και έπειτα παραμένουν σταθερά καθώς χωρίς άνθρακα σταματά η δημιουργία τους (Γράφημα 6-19).



Γράφημα 6-20 Κατανομή του οργανικού άνθρακα σε χωράφι χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού

Όπως φαίνεται στο Γράφημα 6-20 με την καλλιέργεια των χωραφιών ο άνθρακας του εδάφους μειώνεται σημαντικά και φτάνει το επίπεδο των 18 tC/ha στα 10 χρόνια (παρούσα χρονική στιγμή).

Ο λόγος SOM % / Silt-clay % είναι ένας καλός δείκτης γονιμότητας καθώς συμπεριλαμβάνεται στο ποσοστό ιλύος-αργίλου του εδάφους (Quiroga et al., 2006). Μελέτη σε περιοχή της Αργεντινής έδειξε ικανοποιητική απόδοση των χωραφιών κριθαριού με λόγο μεγαλύτερο του 4,4 (Quiroga et al., 2006).



Γράφημα 6-21 Όρια SOC συναρτήσει του κλάσματος ιλύς-αργίλου

Το όριο στην περίπτωση μας είναι :

$$\text{SOM/SOC}=1,72 \text{ \& \text{SOM/S-C}=4,4 \Leftrightarrow \text{SOC/S-C}= 2.56}$$

οπότε για Silt-clay 34% έχουμε κατώφλι SOC = 0,87% = 8,7 g /kg = 10,4 tn C/ha.

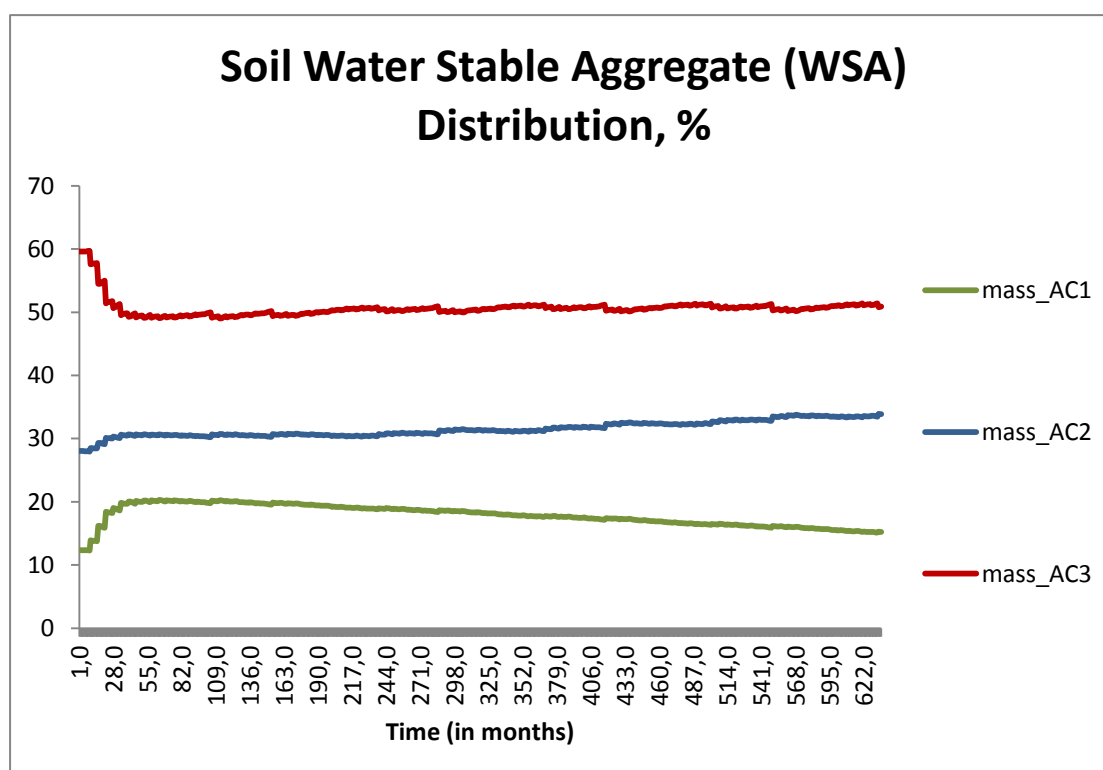
Είναι φανερό ότι για την περίπτωση της Ελλάδας, ειδικότερα για την περιοχή μελέτης και για τις διαφορετικού είδους καλλιέργειες το όριο αυτό είναι χαμηλό και είναι αναγκαία η εύρεση κατώτερου ορίου οργανικού άνθρακα για τα ελληνικά εδάφη.

Το ιδανικό επίπεδο εδαφικής οργανικής ύλης από άποψη κύκλου θρεπτικών και γονιμότητας γενικά θεωρείται 5-8% (Hoskins, 1997). Εάν τα επίπεδα του SOM πέσουν κάτω από το 2-3%, τα θρεπτικά και η χωρητικότητα νερού στο έδαφος περιορίζονται και μπορεί να μην είναι επαρκή να υποστηρίξουν την κανονική ανάπτυξη των φυτών κατά την διάρκεια κάποιων περιόδων ανάπτυξης (Hoskins, 1997).

6.4.2 ΔΙΑΤΗΡΗΣΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

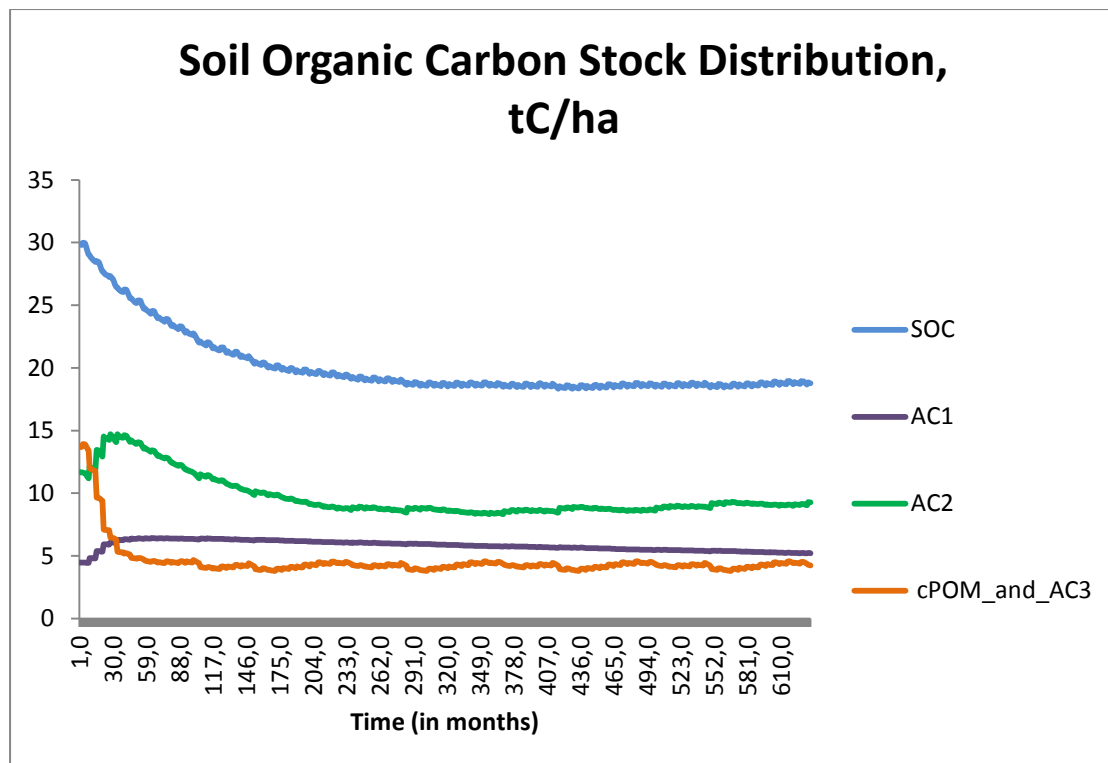
Σε αυτόν τον τρόπο διαχείρισης δύο παράγοντες λήφθηκαν υπόψη για τη διατήρηση της ποιότητας του εδάφους.

1. Ποσότητα του εδαφοβελτιωτικού ώστε ο οργανικός άνθρακας να διατηρείται σε ικανοποιητικό επίπεδο.
2. Ποσότητα του εδαφοβελτιωτικού ώστε να καλύπτονται οι ανάγκες των καλλιεργειών σε άζωτο (N).



Γράφημα 6-22 Κατανομή συσσωματωμάτων, πρακτική διαχείρισης (0,6tn C/ha)

Με την εισαγωγή 0,6 tn C /ha τον χρόνο παρατηρείται σταθεροποίηση στην κατανομή των WSA μετά από πτώση του AC3 και αύξηση των AC2 & AC1 Γράφημα 6-22.



Γράφημα 6-23 Κατανομή οργανικού άνθρακα, πρακτική διαχείρισης (0,6tn C/ha)

Παρατηρείται, επίσης, στην τιμή του SOC (Γράφημα 6-23) ότι σταθεροποιείται γύρω από την τιμή 21 tn C/ha. Η τιμή αυτή δίνει SOM = 3% το οποίο είναι αποδεκτό για την καλή λειτουργία του εδάφους (Hoskins, 1997) .

Γίνεται έλεγχος για την ικανοποίηση της ποσότητας αζώτου που εισέρχεται στο έδαφος.

Οι ανάγκες του φυτού της ντομάτας σε άζωτο είναι περίπου 200 Kg N /ha. Από βιβλιογραφία τιμές αφαίρεσης αζώτου για μελιτζάνα και μαρούλι είναι 120-150 και 80-100 kg/ha αντίστοιχα (ΟΛΥΜΠΙΟΥ, 2001).

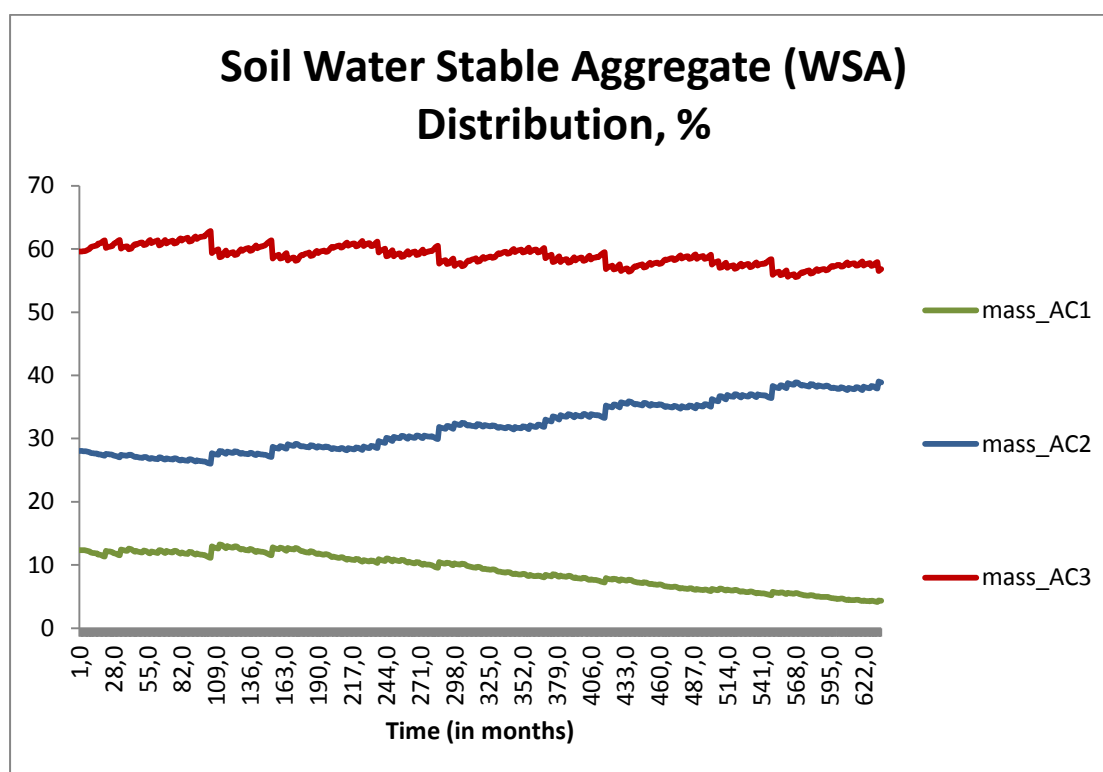
Στην παρούσα μελέτη για απλοποίηση των αναγκών των φυτών σε άζωτο θεωρείται 400 kg /ha/year (2 σοδιές τον χρόνο), ώστε να υπάρξει μια προσεγγιστική τιμή για την εκτίμηση της εισαγωγής του αζώτου.

Ποσότητα compost : $0,6 \text{ (tn C/ha)} / 0,145 \% \text{ OC} = 4,2 \text{ tn/ha}$

Ποσότητα αζώτου = $4,2 \cdot 0,024 = 0,1$ tn N/ha = 100 kg/ha, το οποίο είναι το 25% των θεωρητικών αναγκών.

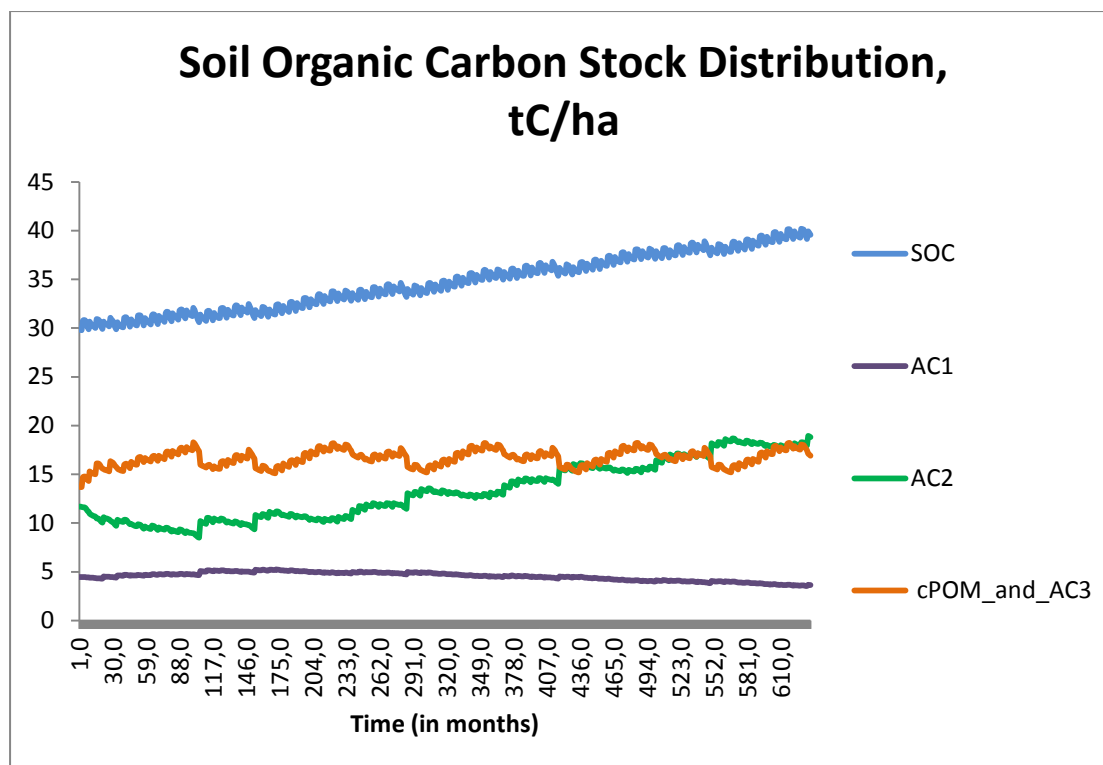
Οπότε αυξάνουμε την ποσότητα του εδαφοβελτιωτικού από 4,2 tn/ha σε 16,8 tn/ha, δηλαδή από 0,6 tn C /ha σε 2,4 tn C /ha τον χρόνο (14.5% περιεκτικότητα σε OC).

Τα αποτελέσματα παρατίθενται παρακάτω (Γράφημα 6-24 & Γράφημα 6-25)



Γράφημα 6-24 Κατανομή συσσωματωμάτων, πρακτική διαχείρισης (2,4 tn C/ha)

Καθώς γίνεται εισαγωγή εδαφοβελτιωτικού παρατηρείται σταθεροποίηση του κλάσματος AC3, μικρή αύξηση του AC2 ακολουθούμενη με την μικρή μείωση του AC1. Η ποσότητα του εδαφοβελτιωτικού φαίνεται επαρκής για την διατήρηση των συσσωματωμάτων (WSA) σε ικανοποιητικά επίπεδα σε σχέση με την αρχική κατάσταση.

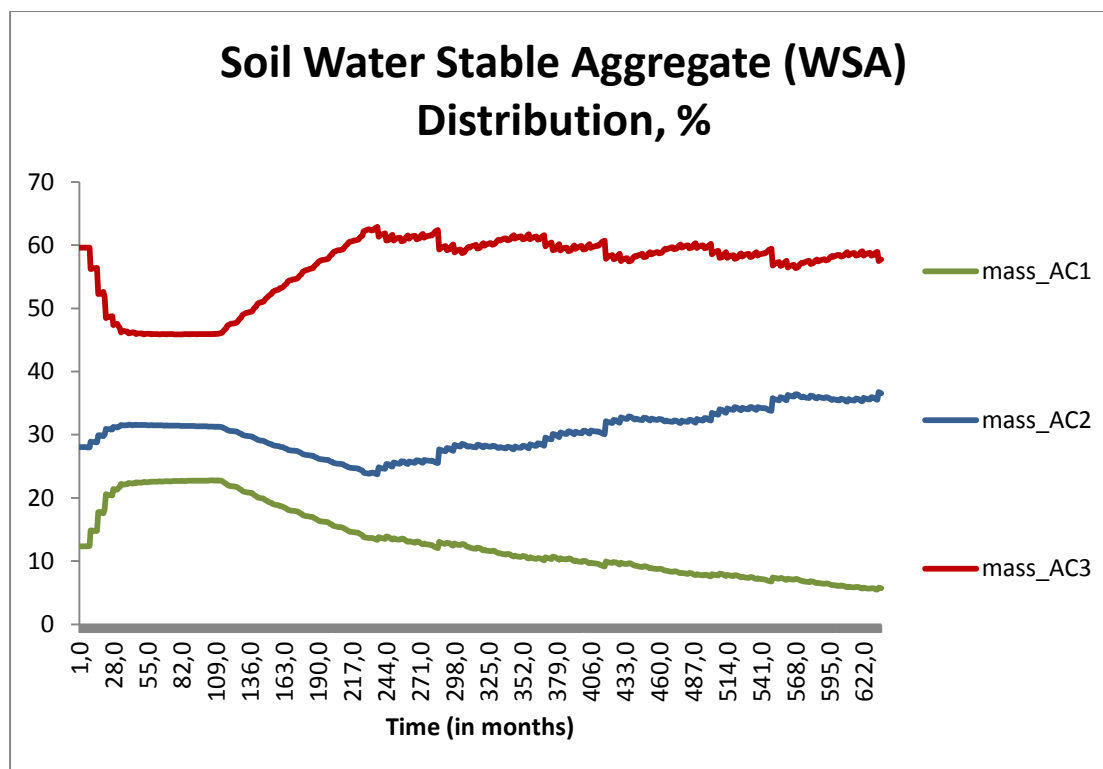


Γράφημα 6-25 Κατανομή οργανικού άνθρακα, πρακτική διαχείρισης (2,4 tn C/ha)

Ο συνολικός άνθρακας του εδάφους παρουσιάζει αύξηση σε βάθος 50ετίας από 30 tn C /ha σε 40 tn C /ha (αύξηση 33%). Ο οργανικός άνθρακας στο AC3 παραμένει σταθερός ενώ αυξάνεται στο AC2 λόγω της συσσώρευσης του κλάσματος ιλύος-αργίλου (silt-clay) σε αυτό. Η ποσότητα (16,8 tn/ha) που εφαρμόζεται φαίνεται να καλύπτει το έλλειμμα σε άνθρακα του χωραφιού κάθε χρόνο και να επιτυγχάνεται συσσώρευση OC στο έδαφος.

6.4.3 ΕΠΑΝΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Σταδιακή επαναφορά του εδάφους που καλλιεργείται χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού για 10 χρόνια (παρούσα χρονική στιγμή), με εφαρμογής ποσότητας εδαφοβελτιωτικού για διατήρηση (2,4 tn C /ha κεφ. 6.4.2) 2 φορές τον χρόνο (Απρίλη και Νοέμβριο) πριν την καλλιέργεια.

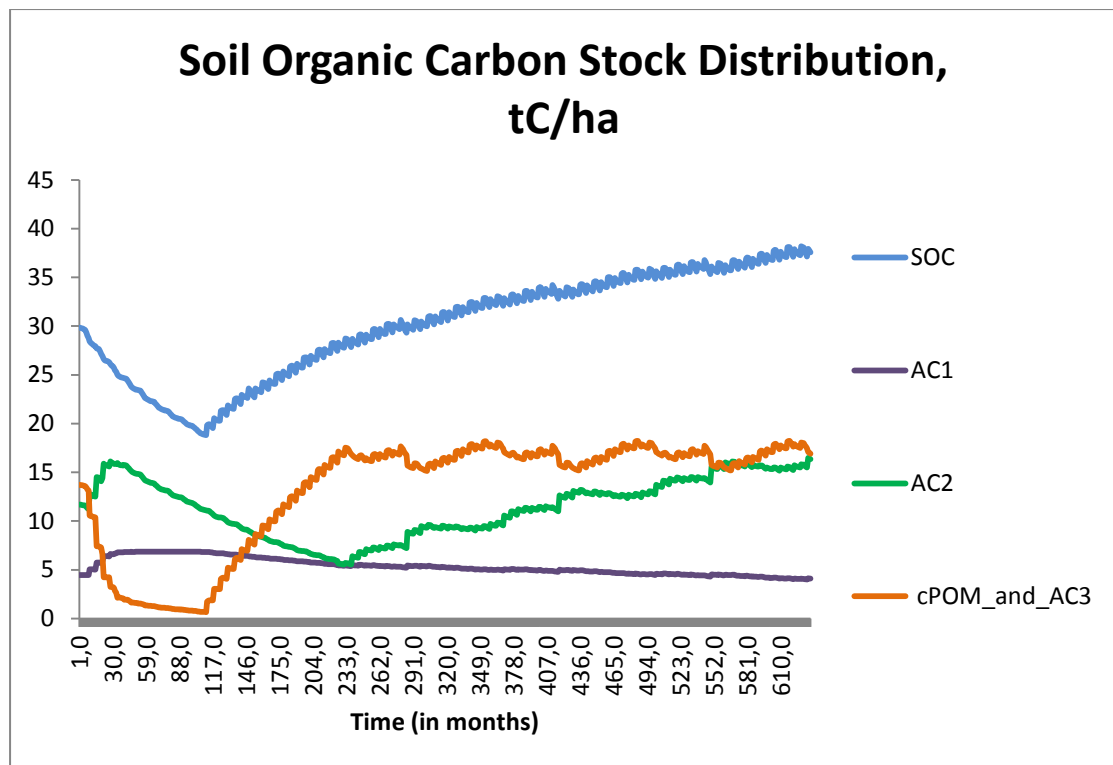


Γράφημα 6-26 Κατανομή συσσωματωμάτων, σενάριο επαναφοράς και διατήρησης κατάστασης εδάφους

Όπως αναμενόταν, οι τιμές μέχρι το 10^ο έτος είναι οι τιμές στο Γράφημα 6-19, καθώς δεν γίνεται προσθήκη compost στο έδαφος με συνέπεια τη μείωση του άνθρακα και την δυσκολία δημιουργίας συσσωματωμάτων στο κλάσμα AC3.

Καθώς αρχίζει η εισαγωγή εδαφοβελτιωτικού (10^ο χρόνο) ξεκινά και ρυθμός δημιουργίας των μάκρο- συσσωματωμάτων να γίνεται μεγαλύτερος από τον ρυθμό καταστροφής τους, οπότε και φτάνει στα αρχικά επίπεδα μετά από 10 χρόνια (20^ο έτος).

Μετά το 20^ο χρόνο παρατηρείται σταθεροποίηση των μάκρο-συσσωματωμάτων και αύξηση των μικρο-συσσωματωμάτων (AC2) καθώς και μείωση του κλάσματος AC1.



Γράφημα 6-27 Κατανομή οργανικού άνθρακα, σενάριο επαναφοράς και διατήρησης κατάστασης εδάφους

Τα 10 πρώτα χρόνια ο οργανικός άνθρακας έχει την κατανομή όπως το Γράφημα 6-20 καθώς δεν υπάρχει εισαγωγή άνθρακα με εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού.

Στο σημείο όπου ξεκινά εφαρμογή compost (10^ο χρόνο) παρατηρείται μια απότομη αύξηση του cPOM (χονδρή σωματιδιακή οργανική ύλη) & AC3, φυσικό επακόλουθο της προσθήκης εδαφοβελτιωτικού.

Μετά τον 20^ο χρόνο με την διατήρηση της εισαγωγής 2,4 tn C/ha παρατηρείται η τάση που υπάρχει στα κλάσματα στο Γράφημα 6-25. Με την σταθεροποίηση του AC3 κλάσματος, ξεκινά η συσσώρευση του AC2 καθώς ακολουθά την κατανομή της μάζας (Γράφημα 6-26).

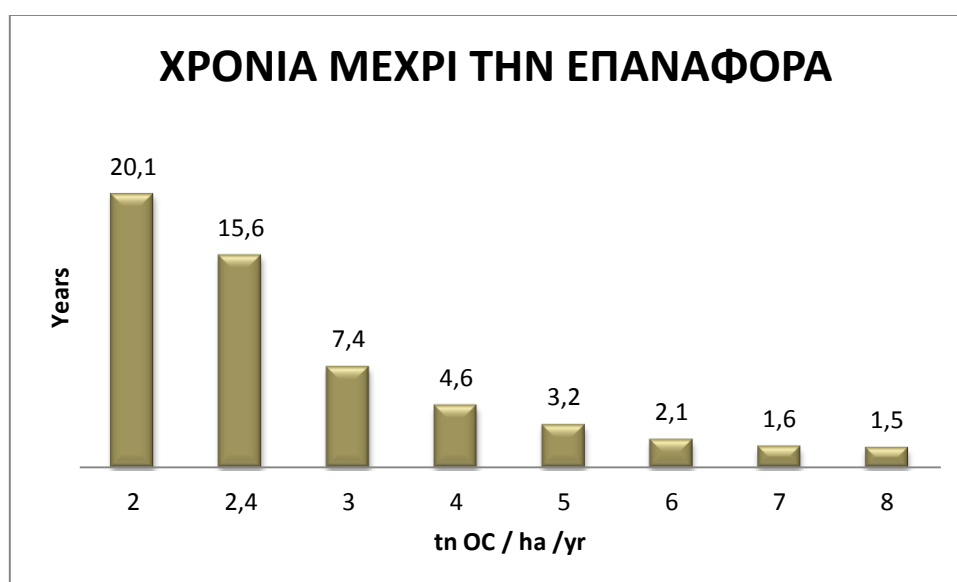
Όπως παρατηρείται στο Γράφημα 6-27, η καμπύλη του SOC (εδαφικός οργανικός άνθρακας) φτάνει στα αρχικά επίπεδα σε 16 χρόνια περίπου μετά από την έναρξη της εφαρμογής.

6.4.4 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑΣ COMPOST ΜΕ ΧΡΟΝΟ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η βέλτιστη ποσότητα εδαφοβελτιωτικού για επαναφορά υπολογίζεται με το τρέξιμο του βαθμονομημένου μοντέλου με διάφορες τιμές εδαφοβελτιωτικού να εφαρμόζονται τον 10^ο χρόνο.

Η συσχέτιση έγινε με την ποσότητα οργανικού άνθρακα που εισάγεται και όχι με την ποσότητα compost ώστε να απαλειφθεί η παράμετρος της περιεκτικότητας OC σε αυτό.

Το εύρος τιμών που επιλέχθηκε είναι από την ελάχιστη ποσότητα διατήρησης της ποιότητας (2,4 tn/ha/yr κεφ 6.4.2) έως την παρούσα τιμή εισαγωγής (8 tn/ha/yr). Η περιοδικότητα και τρόπος εισαγωγής παραμένει ο ίδιος με την πραγματικότητα.



Γράφημα 6-28 Αναγκαίοι μήνες μέχρι την επαναφορά την αρχική κατάσταση συναρτήσει της ποσότητας εδαφοβελτιωτικού που εισάγεται

Όπως ήταν αναμενόμενο με την αύξηση της ποσότητας compost έχουμε μείωση του χρόνου που απαιτείται για την επαναφορά του άνθρακα.

Για να βρεθεί η βέλτιστη τιμή δεν είναι αρκετός μόνο ο χρόνος επαναφοράς αλλά και η απόδοση του εδαφοβελτιωτικού στην μείωση του χρόνου καθώς αυξάνεται η

ποσότητα εισαγωγής, ώστε να γίνεται αποδοτικά η διαχείριση της ποσότητας εδαφοβελτιωτικού και να αποφεύγεται η σπατάλη του.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με την ποσοστιαία μείωση του χρόνου σε σχέση με την ποσότητα OC που εισάγεται:

tn OC /ha/yr	Μείωση %
3	52%
4	71%
5	80%
6	87%
7	90%
8	90%

Πίνακας 6-1 % μείωση χρόνου σε σχέση με 2,4 tn OC/ha/yr (τιμή διατήρησης)

Μεταβολή tn OC /ha	% μείωση χρόνου
2->2,4	22%
2,4->3	52%
3->4	38%
4->5	31%
5->6	34%
6->7	24%
7->8	5%

Πίνακας 6-2 Ποσοστό μείωσης χρόνου επαναφοράς συναρτήσει της μεταβολής του compost

Όπως φαίνεται παραπάνω (Πίνακας 6-2), σε υψηλές τιμές εισαγωγής compost η % μείωση του χρόνου επαναφοράς ανά τόνο οργανικού άνθρακα πέφτει αρκετά. Όσο ανεβαίνει η ποσότητα του compost η απόδοση στην μείωση χρόνου επαναφοράς μειώνεται (Πίνακας 6-1). Αυτό συμβαίνει διότι η σχέση της ποσότητας εδαφοβελτιωτικού που εισάγεται δεν είναι γραμμική με τον χρόνο επαναφοράς στην αρχική κατάσταση. Αυτή η σχέση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους ρυθμούς κατανάλωσης και αφομοίωσης του οργανικού άνθρακα μέσω των εδαφικών διεργασιών.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σημερινές πρακτικές καλλιέργειας σταδιακά υποβαθμίζουν την ποιότητα του εδάφους. Η εισαγωγή του εδαφοβελτιωτικού (Compost) έχει ευεργετικές ιδιότητες στο έδαφος, καθώς έχει την δυνατότητα να προσφέρει τον απαιτούμενο άνθρακα και άζωτο για τη διατήρηση της ποιότητας του εδάφους και την τροφοδοσία των φυτών με θρεπτικά στοιχεία (αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC Πίνακας 4-2).

Καθώς ο άνθρακας συμβάλει σημαντικά στη δημιουργία των συσσωματωμάτων στο έδαφος, με την συνεχή εφαρμογή compost ($55,2 \text{ tn/ha/yr} = 8 \text{ tn C/ha}$), παρατηρείται σημαντική αύξηση αυτών (Γράφημα 6-1). Σημαντικός παράγοντας σε αυτό είναι η ποσότητα cPOM (χονδρή σωματιδιακή οργανική ύλη) που εισάγεται και η προστασίας που παρέχεται στον οργανικό άνθρακα από τη συσσωμάτωση, να υπάρχει μια συνολική αύξηση και διατήρηση του στο κλάσμα AC3 ($>250\mu\text{m}$) και χαμηλά επίπεδα στα AC2 ($250\text{--}53\mu\text{m}$) και AC1 ($<53\mu\text{m}$) όπως φαίνεται και στο Γράφημα 6-2.

Με την παύση της εισαγωγής του compost, ο ρυθμός συσσωμάτωσης γίνεται μικρότερος από τον ρυθμό διάσπασης. Αυτό οδειγεί στη μείωση του κλάσματος AC3 και στην αύξηση του AC2 , καθώς τα μικρο-συσσωματώματα δημιουργούνται μέσα στα μακρο-συσσωματώματα και απελευθερώνονται με την διάσπαση των τελευταίων (Γράφημα 6-7). Ο οργανικός άνθρακας (SOC) ακολουθεί την ροή μάζας, οπότε και αυξάνεται στο κλάσμα AC2 έπειτα από την διάσπαση των AC3 (Γράφημα 6-8).

Με διαφορετική πρακτική διαχείρισης, τα αποτελέσματα του μοντέλου βοήθησαν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Η μη εφαρμογή του compost στο χωράφι δείχνει (Γράφημα 6-20) ότι τα επίπεδα άνθρακα στο έδαφος μειώνονται σημαντικά και φτάνουν στους $18,4 \text{ tn C/ha}$ τον 10^ο χρόνο καλλιέργειας.

Για τη διατήρηση της ποιότητας του εδάφους υπολογίστηκε η ποσότητα εδαφοβελτιωτικού έτσι ώστε να διατηρούνται τα επίπεδα άνθρακα σε

ικανοποιητικά επίπεδα. Η τιμή του compost βρέθηκε να είναι περίπου 13 φορές μικρότερη ($4,2 \text{ tn/ha/yr} = 0,6 \text{ tn C/ha/yr}$) από την εφαρμοζόμενη (Γράφημα 6-23). Η επαλήθευση όμως για ικανοποιητική ποσότητα εισαγωγής αζώτου στο έδαφος για να καλύπτει την κατανάλωση του από τα φυτά δείχνει την ανάγκη για $16,8 \text{ tn/ha/yr}$ (Γράφημα 6-25). Αυτή είναι περίπου 3,3 φορές μικρότερη ποσότητα από αυτή που εφαρμόζεται στην πραγματικότητα και 4 φορές περισσότερη από την κάλυψη μόνο του αναγκαίου άνθρακα.

Στην επαναφορά του εδάφους από εντατική καλλιέργεια 10 χρόνων χωρίς εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού (Γράφημα 6-20), εφαρμόζεται compost $16,8 \text{ tn/ha/yr}$ ($2,4 \text{ tn OC/ha/yr}$). Τα αποτελέσματα δείχνουν την αρχική μείωση του άνθρακα για τα 10 πρώτα χρόνια και έπειτα την απότομη αύξηση μέχρι τον 20^ο χρόνο, όπου το σύστημα σταθεροποιείται. Το σύστημα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση 16 χρόνια μετά την έναρξη της εφαρμογής (Γράφημα 6-27).

Τέλος, καθώς η σχέση της ποσότητας εισαγωγής εδαφοβελτιωτικού δεν είναι γραμμική με τον χρόνο επαναφοράς στην αρχική κατάσταση, η μεγαλύτερη ποσότητα δεν σημαίνει και καλύτερη απόδοση. Εφόσον η ποσότητα για διατήρηση (κεφ. 6.4.2) αρκεί για την επαναφορά στην αρχική κατάσταση (16 χρόνια), παίρνοντας υπόψη την ποσοστιαία μείωση (Πίνακας 6-1) στις τιμές πάνω από 5 tn C/ha , η μείωση του χρόνου είναι μικρή σε σχέση με την επιπλέον ποσότητα εφαρμογής.

8 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΕΤΑΙΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Παρακάτω καταγράφονται κάποιες προτάσεις για ευρύτερη μελέτη και κατανόηση των διεργασιών του εδάφους :

- Μοντελοποίηση πολλών περιοχών για επαλήθευση και μεγαλύτερη κατανόηση των διαφορών που υπάρχουν στα διάφορα εδάφη.
- Μελέτη του αζώτου, φωσφόρου και άλλων θρεπτικών συστατικών για την ποιότητα του εδάφους.
- Μελέτη της επιρροής του οργώματος στις διεργασίες του εδάφους
- Μελέτη και βελτιστοποίηση των διαδικασιών του εργαστηρίου.
- Διερεύνηση της επιρροής της κοκκομετρίας στο επίπεδο του οργανικού άνθρακα.
- Επιρροή των σταδίων ανάπτυξης του φυτού στα επίπεδα του άνθρακα στο έδαφος.
- Τρόποι χρησιμοποίησης του εδαφοβελτιωτικού για αποκατάσταση εδαφών φτωχών σε άνθρακα.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abiven, S., Menasseri, S., Angers, D. a., Leterme, P., 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. *European Journal of Soil Science* 58, 239–247.
- Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C., 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 1–12.
- Agren, G.I., Bosatta, E., 1996. Quality: A bridge between theory and experiment in soil organic matter studies. *Oikos* 76, 522–528.
- Alden, A., 2013. Phyllite [WWW Document]. URL <http://geology.about.com/od/rocks/ig/metrockindex/rocpicphyllite.htm> (accessed 10.5.13).
- Angers, D.A., Carter, M.R., 1996. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils, in: Carter, M.R., Stewart, B.A. (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. Advances in Soil Science. CRC Lewis publishers, Boca Raton, F, pp. 193–211.
- Arias, M.E., González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., Ball, A.S., 2005. Soil health—a new challenge for microbiologists and chemists. *International Microbiology* 8, 13–21.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research* 53, 215–230.
- Banwart, S. et al., 2011. Assessing soil processes and function across an international network of critical zone observatories: research hypotheses and experimental design. Special Issue on Critical Zone Observatory research. *Vadose Zone Journal* 10, 974–987.
- Blum, W.E.H., 2005. Functions of Soil for Society and the Environment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 4, 75–79.
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, a, Imeson, a. ., Soriano-Soto, M., 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena* 44, 47–67.
- Bossuyt, H., Six, J., Hendrix, P.F., 2005. Protection of soil carbon by microaggregates within earthworm casts. *Soil Biology and Biochemistry* 37, 251–258.

- Bot, A., Benites, J., 2005. The importance of soil organic matter , Key to drought-resistant soil and sustained food and production. FAO, Rome.
- Bouyoucos, G.J., 1962. Hydrometer method improved for making particle and size analysis of soils. *agronomie* 54, 464–465.
- Brantley, S.L., White, T.S., White, A.F., Sparks, D., Richter, D., Pregitzer, K., Derry, L., Chorover, J., Chadwick, O., April, R., Anderson, S., Amundson, R., 2006. Frontiers in exploration of the Critical Zone: Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF), October 24-26, 2005, Newark, DE, 30p.
- Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3–22.
- Doran, J.W., 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88, 119–127.
- Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and assessing soil quality, in: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Defining Soil Quality for Sustainable Environment*. Soil Science Society of America: Madison, WI, WI, pp. 3–21.
- Doran, J.W., Safley, M., 1997. Defining and assessing soil health and sustainable productivity, in: Pankhurst, C., Doube, B.M., Gupta, V.V.S.R. (Eds.), *Biological Indicators of Soil Health*. CAB INTERNATIONAL, pp. 1–28.
- Douglas, J., Goss, M., 1982. Stability and organic matter content of surface soil aggregates under different methods of cultivation and in grassland. *Soil and Tillage Research* 2, 155–175.
- Elliott, E., 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal* 50, 627–633.
- Fernandez-Ugalde, O., Barré, P., Hubert, F., Virto, I., Girardin, C., Ferrage, E., Caner, L., Chenu, C., 2012. To what extent clay mineralogy affect soil aggregation? Insights from fractionation analyses conducted on soils under different land-uses. *geophysical research Abstracts* 14.
- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., Clarke, P., 1994. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. *journal of soil science* 32, 285–309.
- Grandy, a S., Neff, J.C., 2008. Molecular C dynamics downstream: the biochemical decomposition sequence and its impact on soil organic matter structure and function. *The Science of the total environment* 404, 297–307.

- Gupta, V., Germida, J., 1988. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. *Soil Biology and Biochemistry* 20, 777–786.
- Haynes, R.J., Beare, M., 1996. Aggregation and organic matter storage in mesothermal, humid soils, in: Carter, M.R., Stewart, B.A. (Eds.), *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural soils*. Advances in Soil Science. CRC Press, Boca Raton, Fla, pp. 213–262.
- Helfrich, M., Ludwig, B., Potthoff, M., Flessa, H., 2008. Effect of litter quality and soil fungi on macroaggregate dynamics and associated partitioning of litter carbon and nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 1823–1835.
- Hoskins, B., 1997. *Soil testing handbook for professionals in agriculture, horticulture, nutrient and residuals management*, 3rd ed, Maine Agriculture and Forestry Experiment Station,.
- Jastrow, J., 1996. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 28, 665–676.
- Jastrow, J.D., Amonette, J.E., Bailey, V.L., 2007. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration. *climate change* 80, 5–23.
- Karlen, D.L., Ditzler, C. a., Andrews, S.S., 2003. Soil quality: why and how? *Geoderma* 114, 145–156.
- Kleber, M., Sollins, P., Sutton, R., 2007. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry* 85, 9–24.
- Kong, A.Y.Y., Six, J., Bryant, D.C., Denison, R.F., van Kessel, C., 2005. The Relationship between Carbon Input, Aggregation, and Soil Organic Carbon Stabilization in Sustainable Cropping Systems. *Soil Science Society of America Journal* 69, 1078–1085.
- Krull, E., Skjemstad, J., Baldock, J., 2004. Functions of soil organic matter and the effect on soil properties.
- Lal, R., 2002. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)* 116, 353–62.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1–22.

- Lewandowski, A., Zumwinkle, M., Fish, A., 1999. Assessing the soil system: a Review of soil quality literature. St. Paul, MN.
- Lichter, K., Govaerts, B., Six, J., Sayre, K.D., Deckers, J., Dendooven, L., 2008. Aggregation and C and N contents of soil organic matter fractions in a permanent raised-bed planting system in the highlands of Central Mexico. *Plant and Soil* 305, 237–252.
- Meentemeyer, V., 1978. Macroclimate the lignin control o litter decomposition rates. *Ecology* 59, 465–472.
- Melillo, J., Aber, J., Muratore, J., 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63, 621–626.
- Melillo, J.M., Aber, J.D., Linkins, A.E., Ricca, A., Fry, B., Nadelhoffer, K.J., 1989. Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: Plant litter to soil organic matter. *Plant and Soil* 115, 189–198.
- Nikolaidis, N.P., 2011. Human impacts on soils: Tipping points and knowledge gaps. *Applied Geochemistry* 26, S230–S233.
- Nikolaidis, N.P., Bidoglio, G., 2013. Modeling of Soil Organic Matter and Structure Dynamics: A Synthesis Review. *Geoderma in review*.
- Oades, J., 1978. Mucilages at the root surface. *journal of soil science* 29.
- Oades, J., 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and soil* 76, 319–337.
- Parton, W., Silver, W.L., Burke, I.C., Grassens, L., Harmon, M.E., Currie, W.S., King, J.Y., Adair, E.C., Brandt, L.A., Hart, S.C., Fasth, B., 2007. Global-Scale Similarities in Nitrogen Release Patterns During Long-Term Decomposition. *science* 315, 361–364.
- Plante, A.F., McGill, W., 2002. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil and Tillage Research* 66, 79–92.
- Puget, P., Chenu, C., Balesdent, J., 2000. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil*
- Quartzite [WWW Document], 2005. . University of Auckland, New ZeaLa. URL http://flexiblelearning.auckland.ac.nz/rocks_minerals/rocks/quartzite.html (accessed 10.5.13).

- Quiroga, a., Funaro, D., Noellemeyer, E., Peinemann, N., 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 90, 63–68.
- Reeves, D., 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research* 43, 131–167.
- Rillig, M., 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian journal of soil science* 84, 355–363.
- Schist [WWW Document], 2005. . University of Auckland, New Zealand. URL http://flexiblelearning.auckland.ac.nz/rocks_minerals/rocks/schist.html (accessed 10.5.13).
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79, 7–31.
- Six, J., Conant, R.T., E.A., P., Paustian, K., 2002a. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241, 155–176.
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S.M., de Moraes, J.C., Alberecht, A., 2002b. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. *agronomie* 22, 755–775.
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O’mara, F., Rice, C., Scholes, B., Sirotenko, O., 2007. Agriculture, in: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meyer, L.A. (Eds.), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York.
- Stamati, F.E., 2012. Ph.D. Dissertation: Carbon and nitrogen cycling in agricultural lands. Technical University of Crete.
- Stamati, F.E., Nikolaidis, Nikolaos P., Banwart, S., Blum, W.E.H., 2013a. A coupled carbon, aggregation, and structure turnover (CAST) model for topsoils. *Geoderma* 211–212, 51–64.
- Stamati, F.E., Nikolaidis, N.P., Schnoor, J.L., 2013b. Modeling topsoil carbon sequestration in two contrasting crop production to set-aside conversions with RothC – Calibration issues and uncertainty analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 165, 190–200.

- Stockmann, U., Adams, M. a., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., McBratney, A.B., Courcelles, V.D.R. De, Singh, K., Wheeler, I., 2011. Managing the soil-plant system to mitigate atmospheric CO₂. Sydney.
- Tisdall, J.M., Oades, J.M., 1982. No Title. *journal of soil science* 33, 141–163.
- TUC HERS LAB, 2012. Cast model User Manual.
- Virto, I., Barré, P., Chenu, C., 2008. Microaggregation and organic matter storage at the silt-size scale. *Geoderma* 146, 326–335.
- Von Lütow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B., 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology and Biochemistry* 39, 2183–2207.
- Walkey, A., Black, L., 1934. examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *soil science* 37, 29–38.
- Wright, S.F., Upadhyaya, A., 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 198, 97–107.
- ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2001. Αειφόρος ανάπτυξη της Ευρώπης για έναν καλύτερο κόσμο : Στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την αειφόρο ανάπτυξη (COM 264). Brussels.
- ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2002. Προς μια θεματική στρατηγική για την προστασία του εδάφους (COM 179). Brussels.
- ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΥΡΩΠΑΙΚΩΝ ΚΟΙΝΟΤΗΤΩΝ, 2006. Θεματική στρατηγική για την προστασία του εδάφους.COM (231). Brussels.
- Κουκουλάκης, Π., Σιμώνης, Α., Γκέρτσος, Α., 2000. Η οργανική ουσία του εδάφους. Το πρόβλημα των ελληνικών εδαφών. Σταμούλη Α.Ε.
- ΟΛΥΜΠΙΟΥ, ΧΡΙΣΤΟΥ Μ., 2001. Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΚΗΠΕΥΤΙΚΩΝ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ. ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΤΑΜΟΥΛΗ Α.Ε., ΑΘΗΝΑ.

10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΔΕΙΓΜΑ	υγρασία %
C	7%
1	28%
2	12%
3	7%

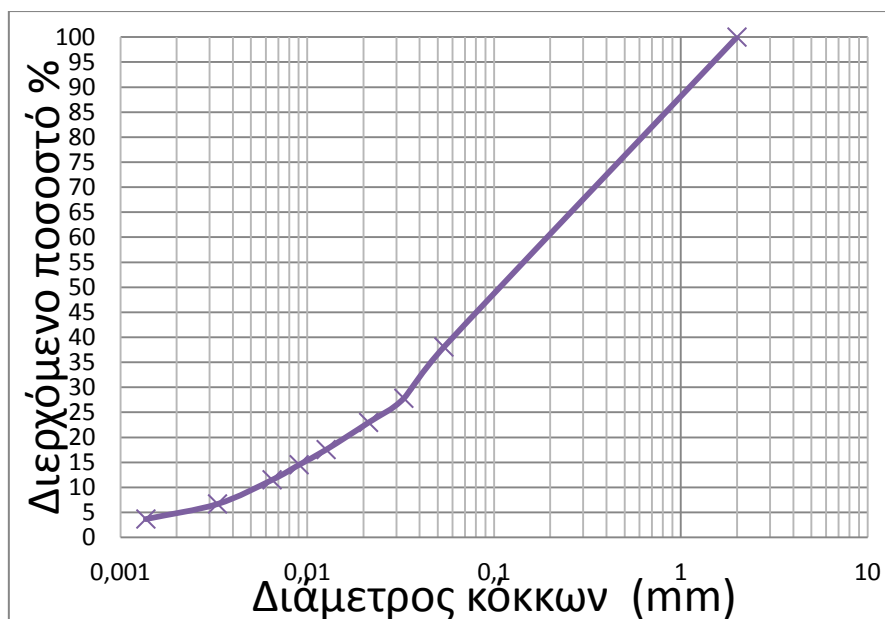
Πίνακας 10-1 Υγρασία δειγμάτων

Δείγμα	pH	EC
C	6,99	263
1	7,91	876
2	6,75	406
3	7,39	380

Πίνακας 10-2 pH & EC

	Μ. Όρος	st. error
sand	63,3%	0,53
slit -clay	36,7%	0,53
clay	3,3%	0,27

Πίνακας 10-3 Κοκκομετρία



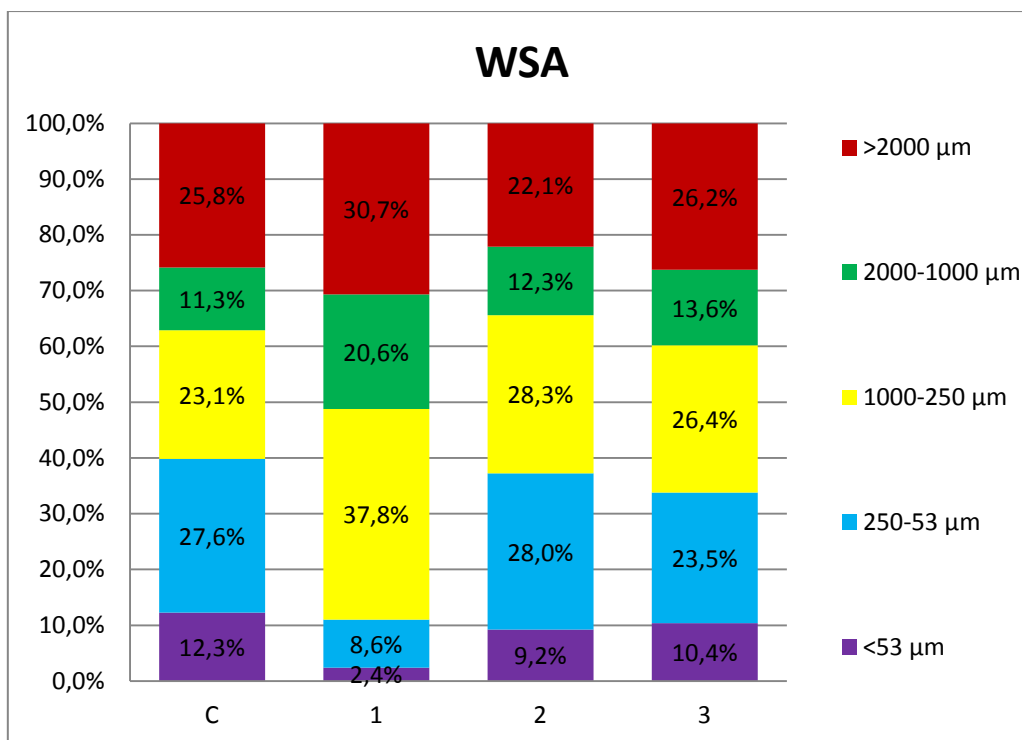
Γράφημα 10-1 Κοκκομετρία δείγματος <2mm

WSA				
Κλάσεις (μm)	C	1	2	3
>2000 μm	25,8%	30,7%	22,1%	26,2%
2000-1000 μm	11,3%	20,6%	12,3%	13,6%
1000-250 μm	23,1%	37,8%	28,3%	26,4%
250-53 μm	27,6%	8,6%	28,0%	23,5%
<53 μm	12,3%	2,4%	9,2%	10,4%

Πίνακας 10-4 Ποσοστά συσσωματωμάτων

standard error	C	1	2	3
>2000 μm	3,5%	2,8%	2,3%	0,3%
2000-1000 μm	0,7%	1,1%	0,5%	0,3%
1000-250 μm	1,3%	2,8%	1,5%	0,5%
250-53 μm	1,0%	0,1%	1,0%	0,2%
<53 μm	0,5%	0,1%	0,3%	0,4%

Πίνακας 10-5 Τιμές τυπικού σφάλματος WSA



Γράφημα 10-2 Κατανομή των συσσωματωμάτων

Calculations for silt-clay mass, %						
Aggregate Fraction	+2	+1	+250	+53	-53	sum
g sub-fraction/100g aggregate						
+2	79,0%	-	-	-	-	
+1	0,6%	75,6%	-	-	-	
+250	1,1%	1,3%	63,4%	-	-	
+53	2,9%	4,0%	7,8%	68,5%	-	
-53	16,5%	19,1%	28,8%	31,5%	-	
sand	83,5%	80,9%	71,2%	68,5%	-	
g sub fraction/100g bulk soil						
+2	20,42%	-	-	-	-	
+1	0,15%	8,51%	-	-	-	
+250	0,28%	0,15%	14,63%	-	-	
+53	0,74%	0,45%	1,80%	18,88%	-	
-53	4,26%	2,15%	6,66%	8,67%	12,25%	34,0%
g (s-c)/100g (s-c)						
s-c	12,5%	6,3%	19,6%	25,5%	36,0%	100,0%
S-C mass, %						
s-c AC3	38,5%					
s-c AC2	25,5%					
s-c AC1	36,0%					

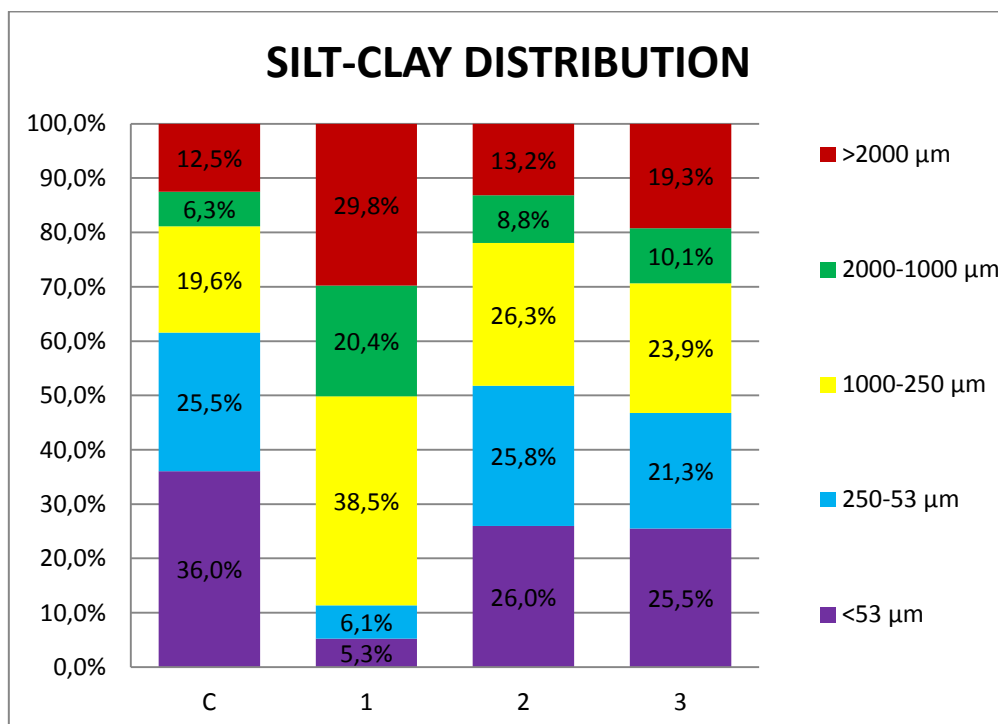
Πίνακας 10-6 Υπολογισμός μάζας ιλύος-αργίλου% στην περίπτωση του αρχικού δείγματος (C)

WSA SAND - CORRECTION				
Κλάσεις (μm)	C	1	2	3
>2000 μm	4,3%	13,6%	4,7%	7,8%
2000-1000 μm	2,2%	9,3%	3,1%	4,1%
1000-250 μm	6,7%	17,5%	9,3%	9,7%
250-53 μm	8,7%	2,8%	9,2%	8,6%
<53 μm	12,3%	2,4%	9,2%	10,4%

Πίνακας 10-7 συσσωματώματα με διόρθωση άμμου

standard error	C	1	2	3
>2000 μm	0,6%	2,8%	0,4%	0,1%
2000-1000 μm	0,1%	1,2%	0,2%	0,1%
1000-250 μm	0,4%	0,4%	0,7%	0,2%
250-53 μm	0,3%	0,2%	0,3%	0,1%
<53 μm	0,5%	0,1%	0,3%	0,4%

Πίνακας 10-8 Τυπικό σφάλμα στην διόρθωση άμμου στα WSA



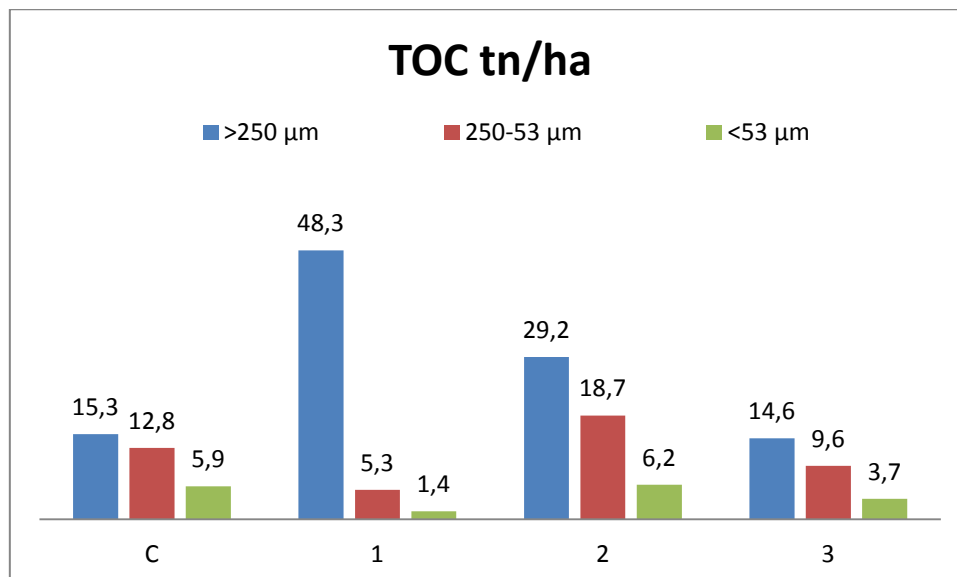
Γράφημα 10-3 Κατανομή ιλύος-αργίλου στα κλάσματα

	TOC (g/kg)	TN (g/kg)	TC (g/kg)	TOC / TC	TOC / TN
C	39,41	3,11	47,90	0,82	12,69
1	60,57	3,68	78,62	0,77	16,45
2	57,81	4,24	69,76	0,83	13,63
3	31,28	2,62	34,33	0,91	11,92

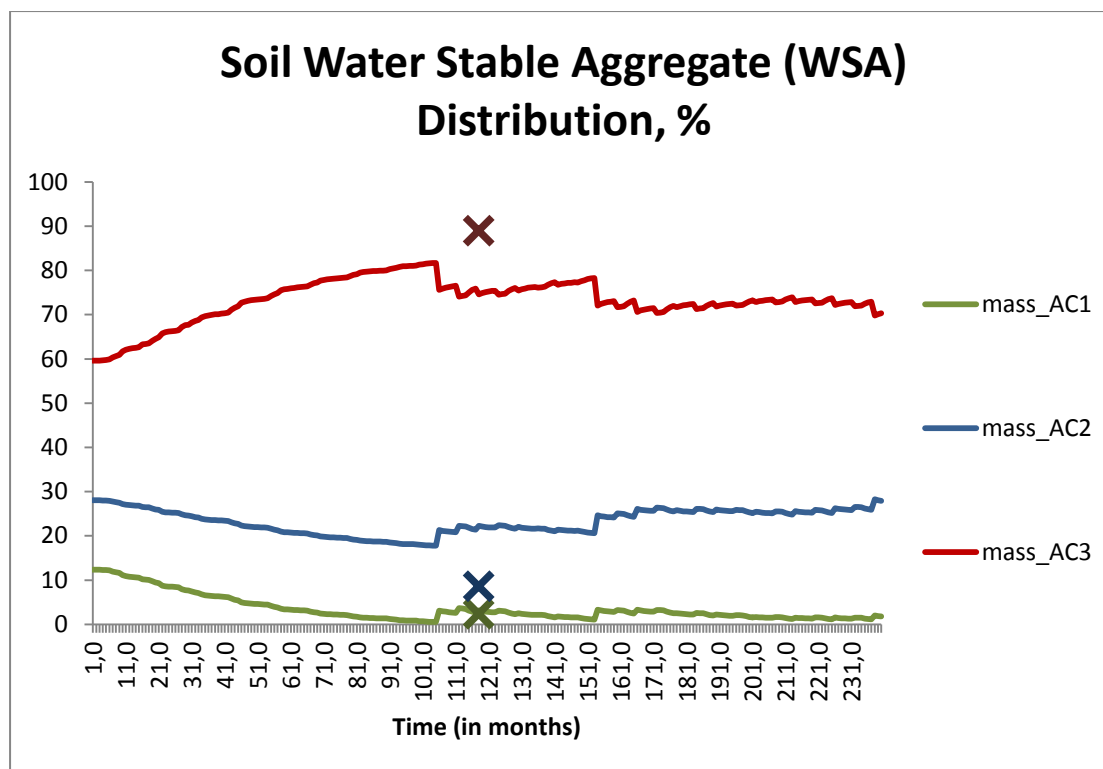
Πίνακας 10-9 Μετρήσεις άνθρακα και αζώτου

TOC tn/ha	initial	10 years X2	8 years X2	3 years X2
	C	1	2	3
>250 μm	15,3	48,3	29,2	14,6
250-53 μm	12,8	5,3	18,7	9,6
<53 μm	5,9	1,4	6,2	3,7
total	34,1	55,1	54,1	27,9

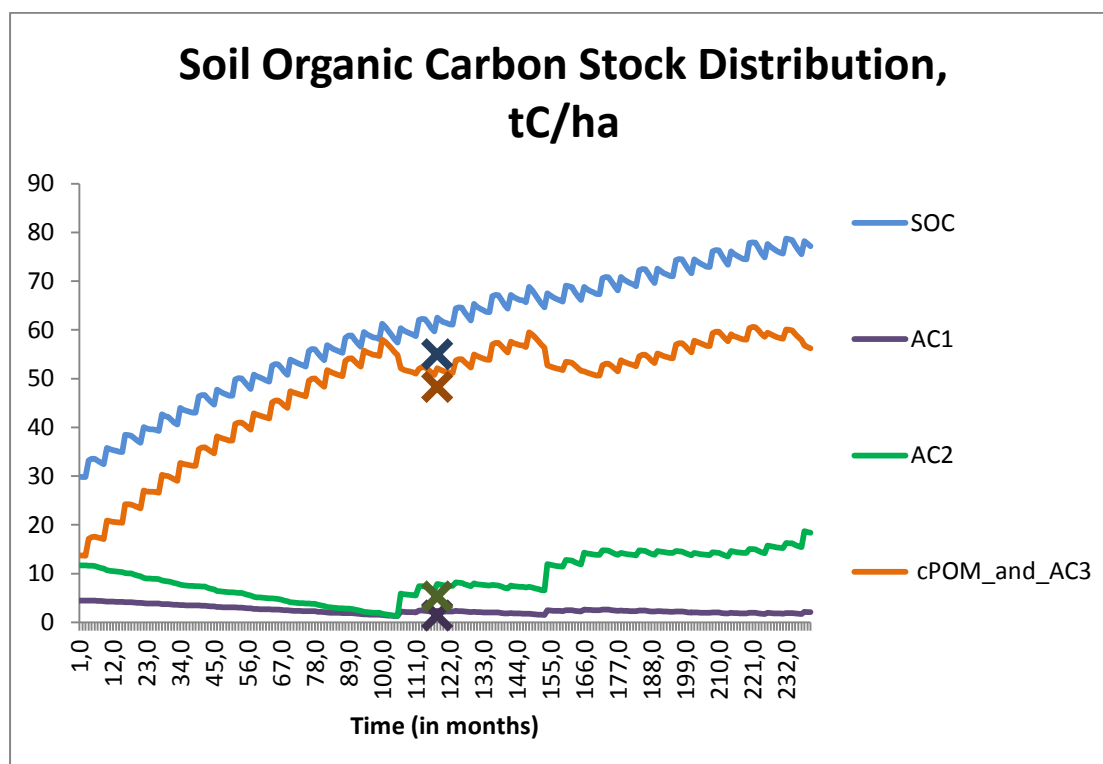
Πίνακας 10-10 Τιμές οργανικού άνθρακα στα κλάσματα



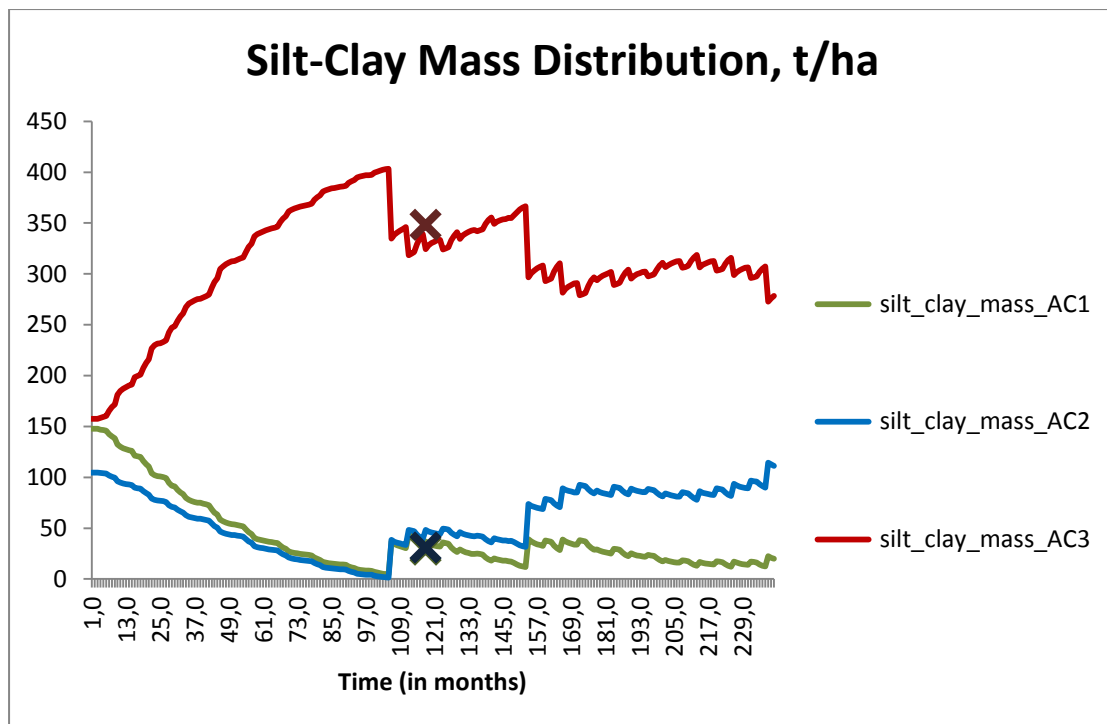
Γράφημα 10-4 Τιμές οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (tn/ha)



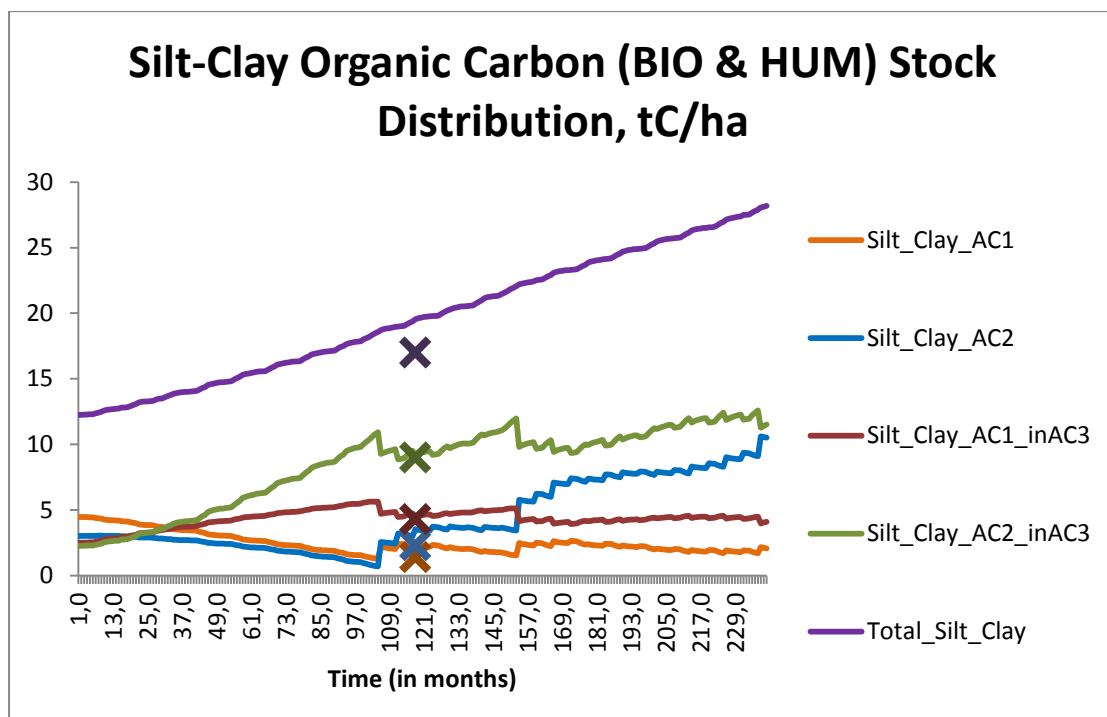
Γράφημα 10-5 Κατανομή WSA (1^ο χωράφι)



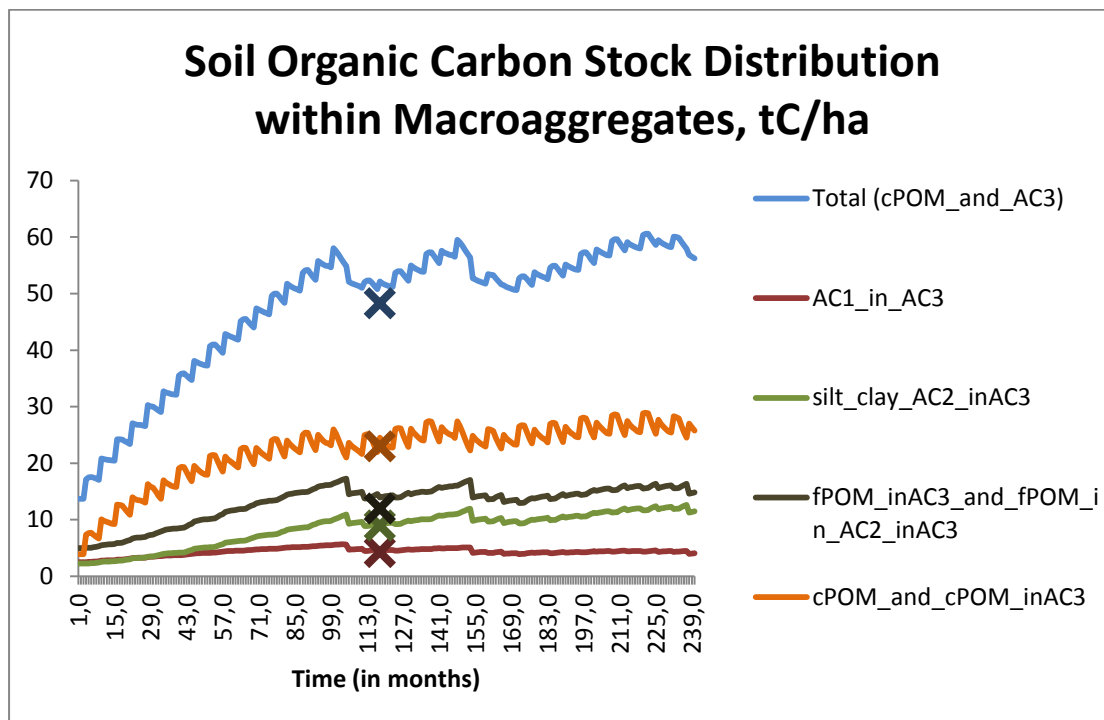
Γράφημα 10-6 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (1^ο χωράφι)



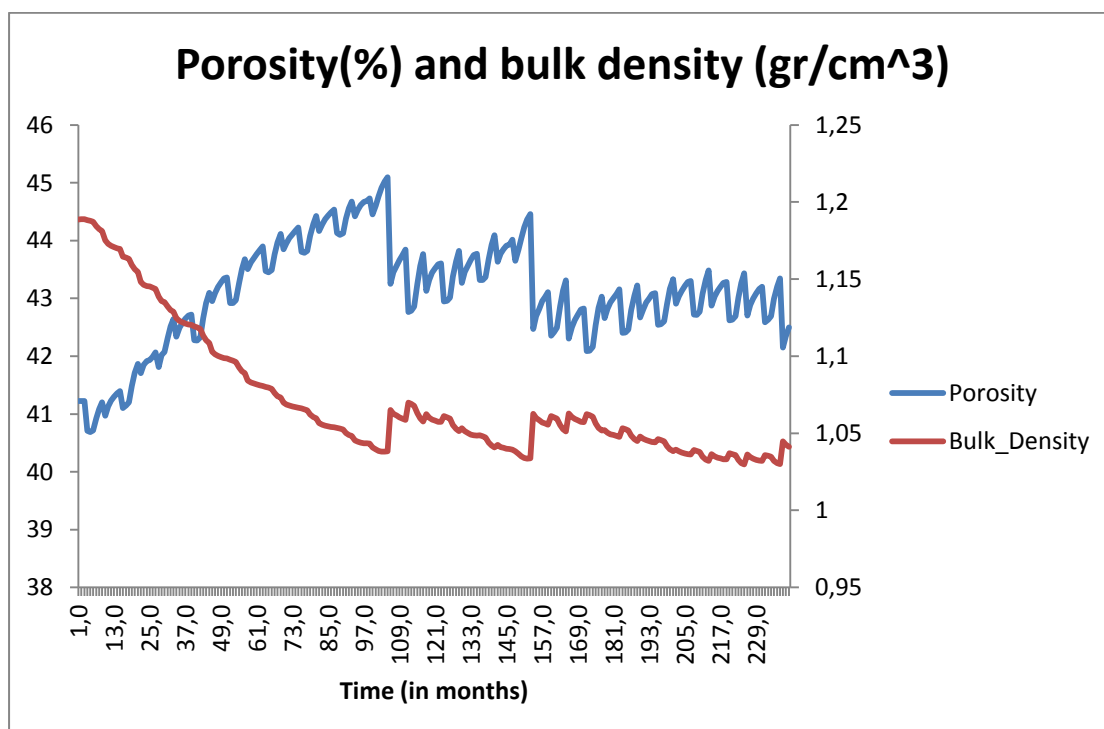
Γράφημα 10-7 Κατανομή αργίλου και ιλύος στα κλάσματα (1^ο χωράφι)



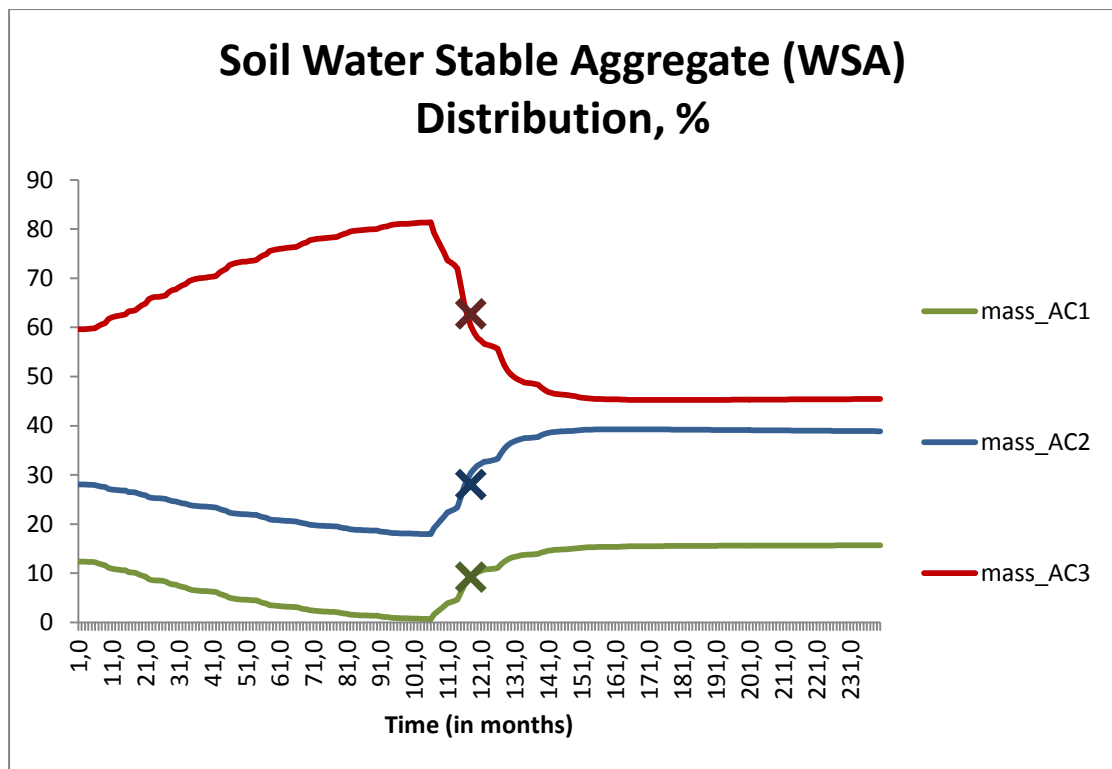
Γράφημα 10-8 Κατανομή οργανικού άνθρακα στην άργιλο και ιλύ (1^ο χωράφι)



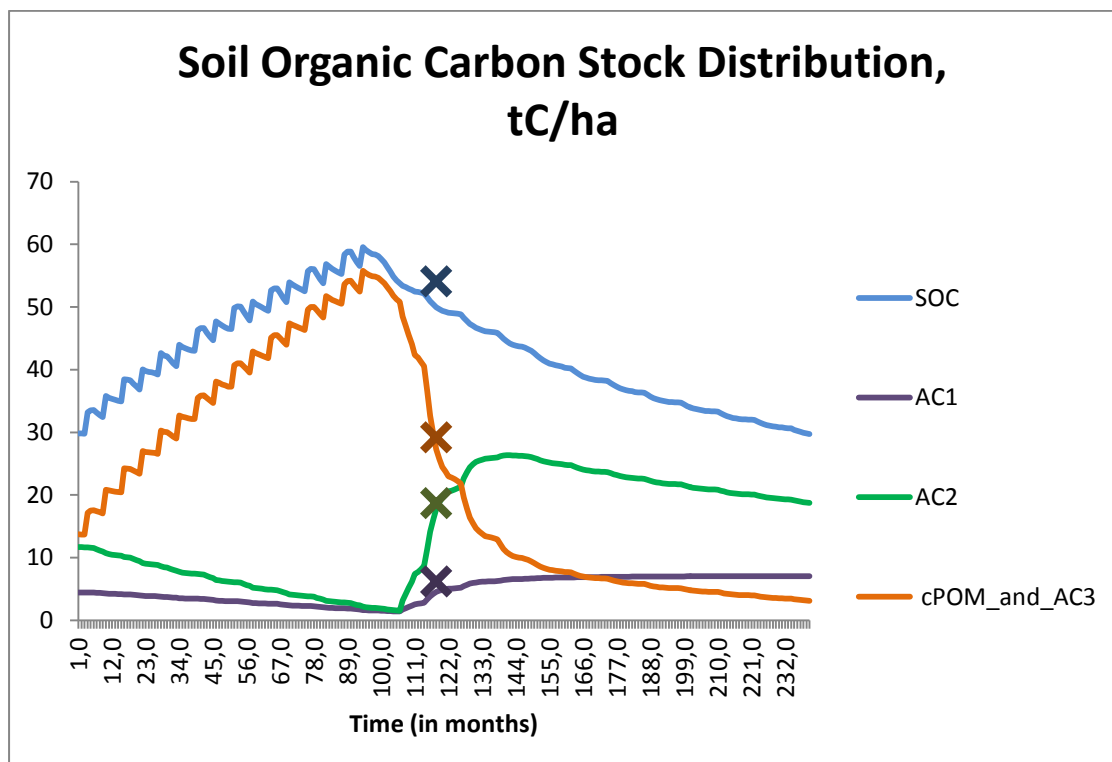
Γράφημα 10-9 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα του AC3 (1^ο χωράφι)



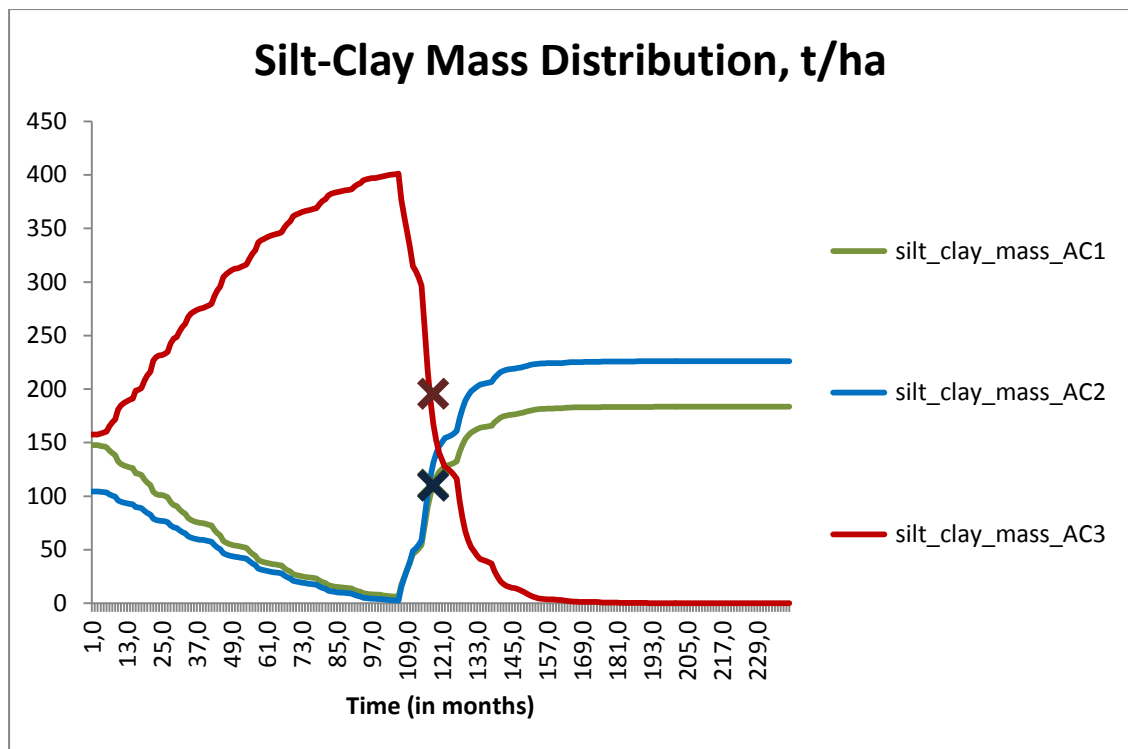
Γράφημα 10-10 Πορώδες και πυκνότητα εδάφους (1^ο χωράφι)



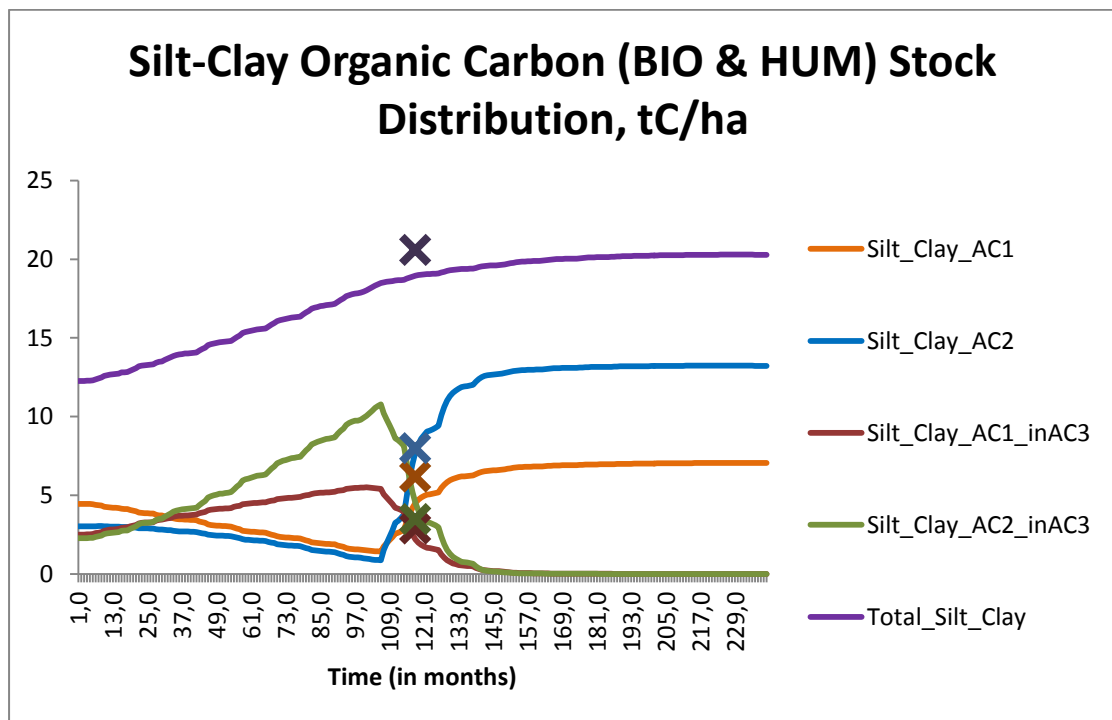
Γράφημα 10-11 Κατανομή WSA (2^ο χωράφι)



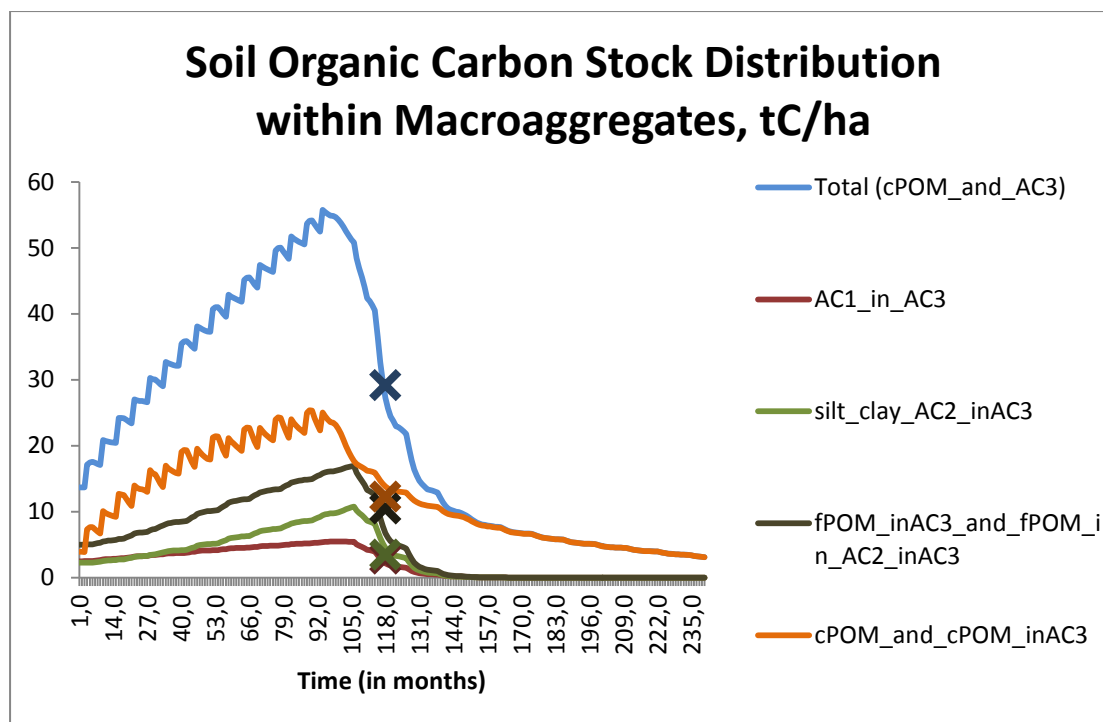
Γράφημα 10-12 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (2^ο χωράφι)



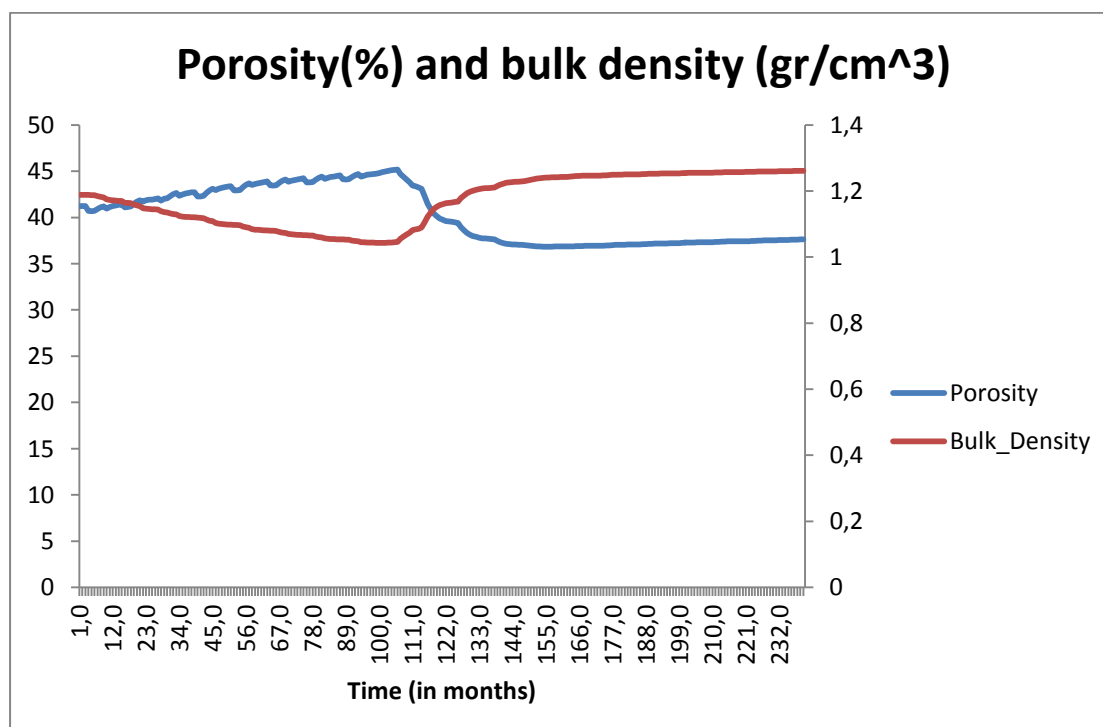
Γράφημα 10-13 Κατανομή αργίλου και ιλύος στα κλάσματα (2^ο χωράφι)



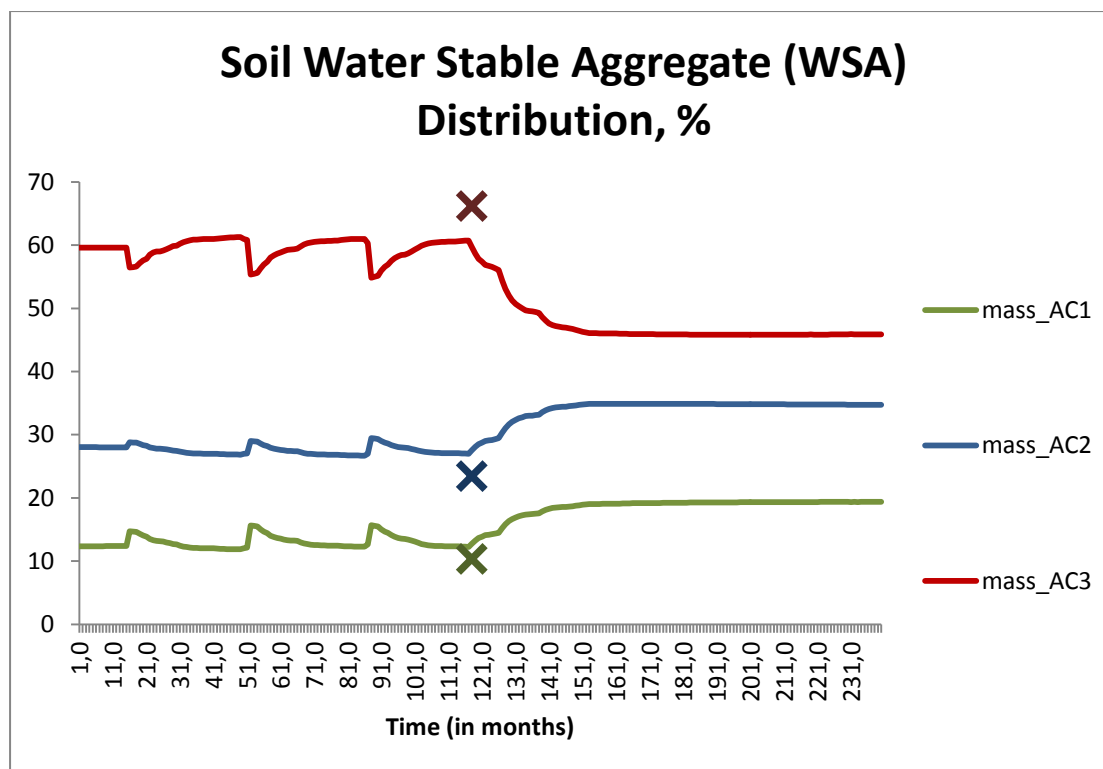
Γράφημα 10-14 Κατανομή οργανικού άνθρακα στην άργιλο και ιλύ (2^ο χωράφι)



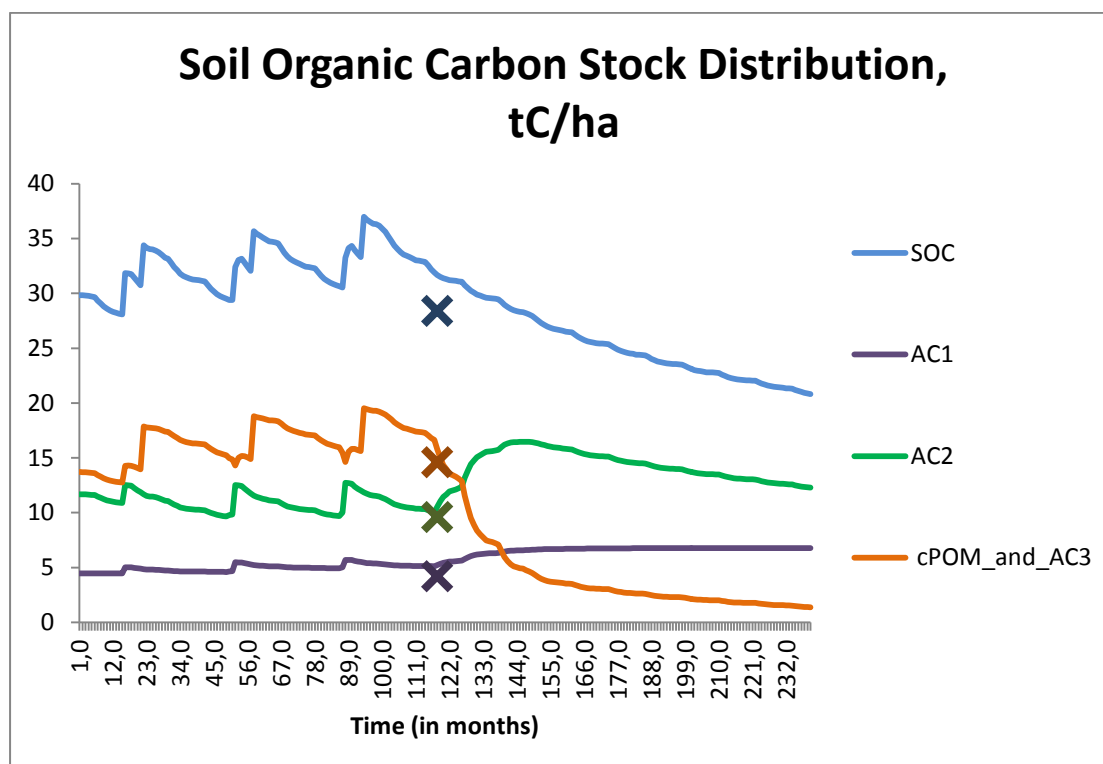
Γράφημα 10-15 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα του AC3 (2^ο χωράφι)



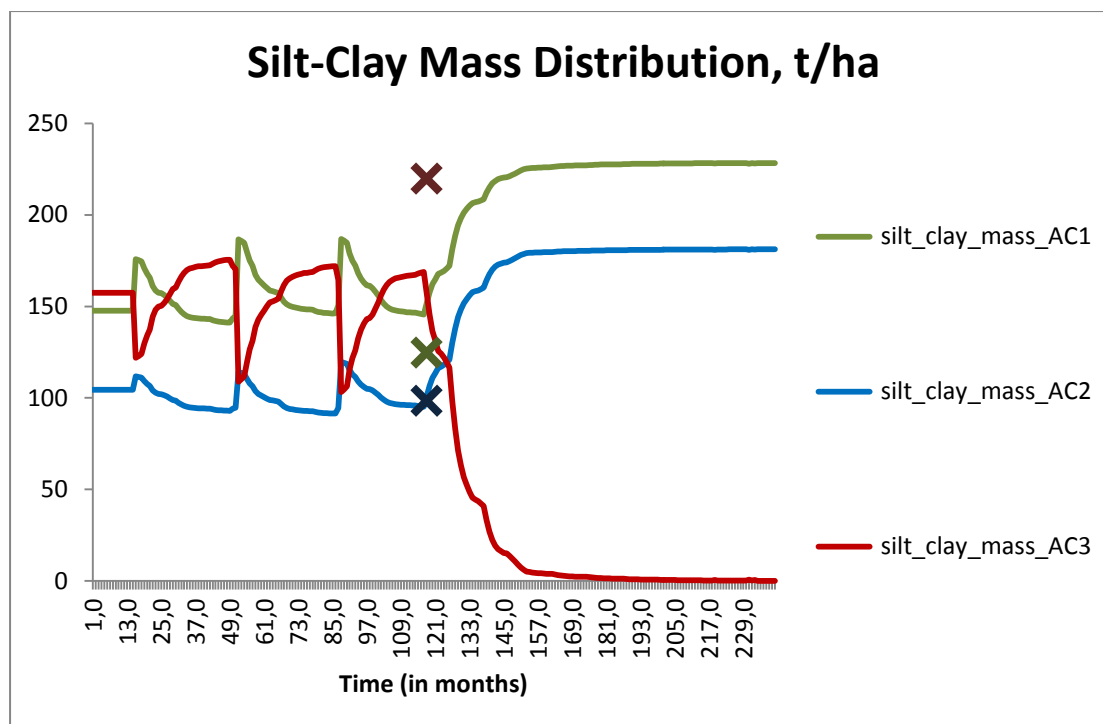
Γράφημα 10-16 Πορώδες και πυκνότητα εδάφους (2^ο χωράφι)



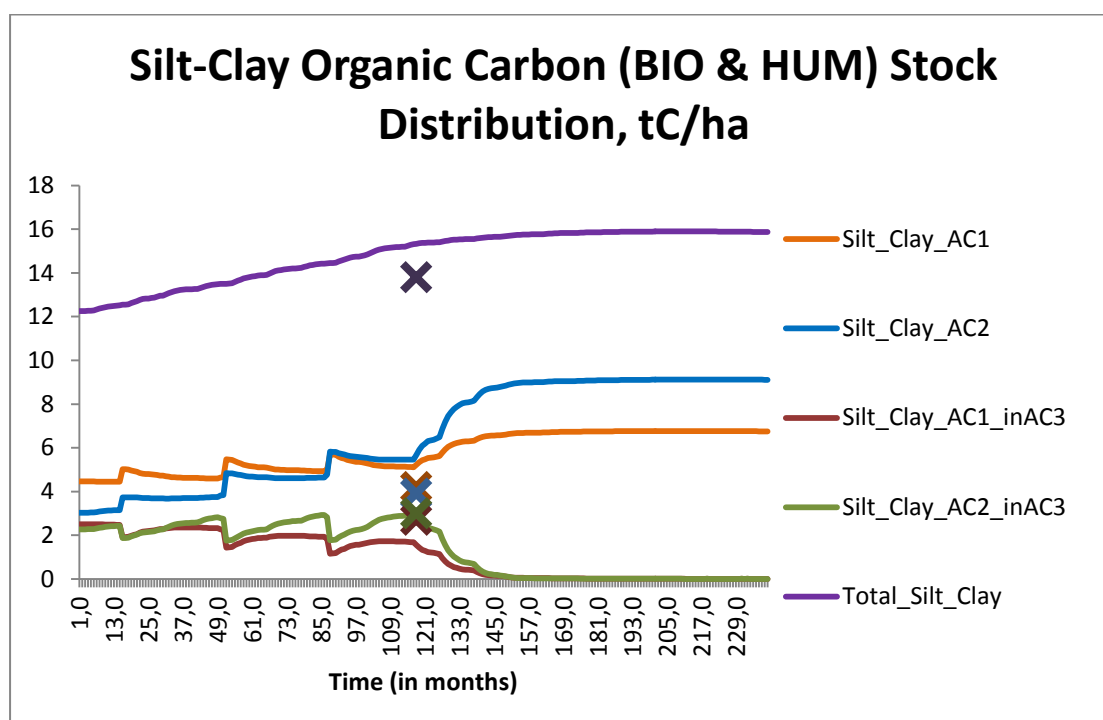
Γράφημα 10-17 Κατανομή WSA (3^ο χωράφι)



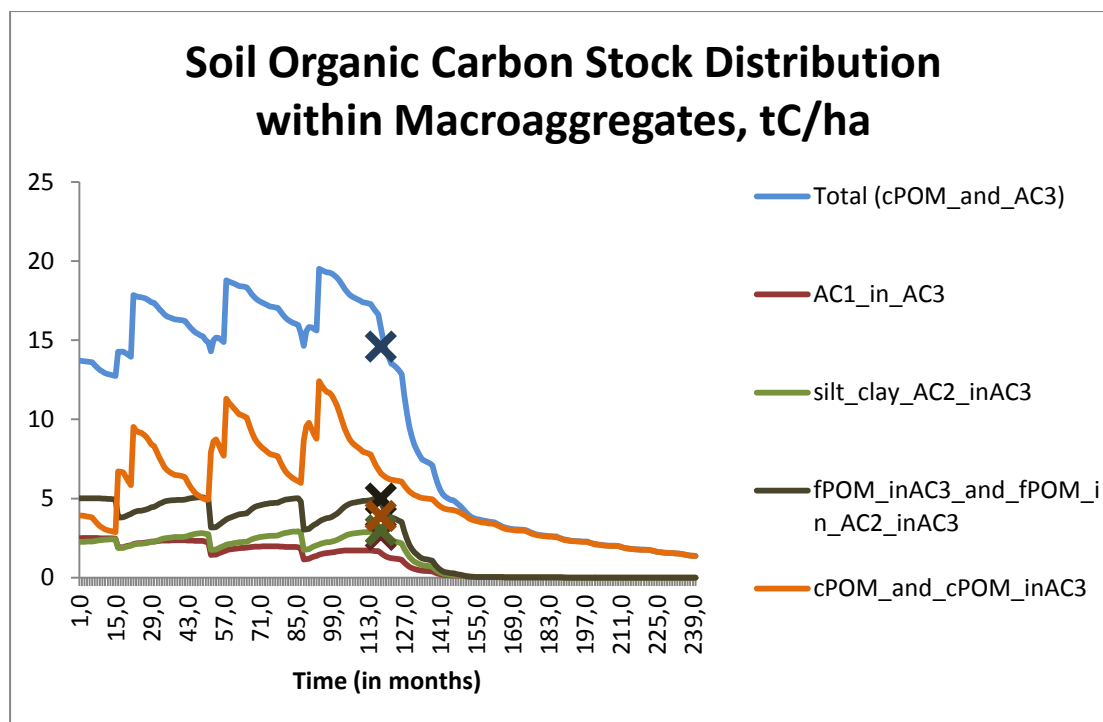
Γράφημα 10-18 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα (3^ο χωράφι)



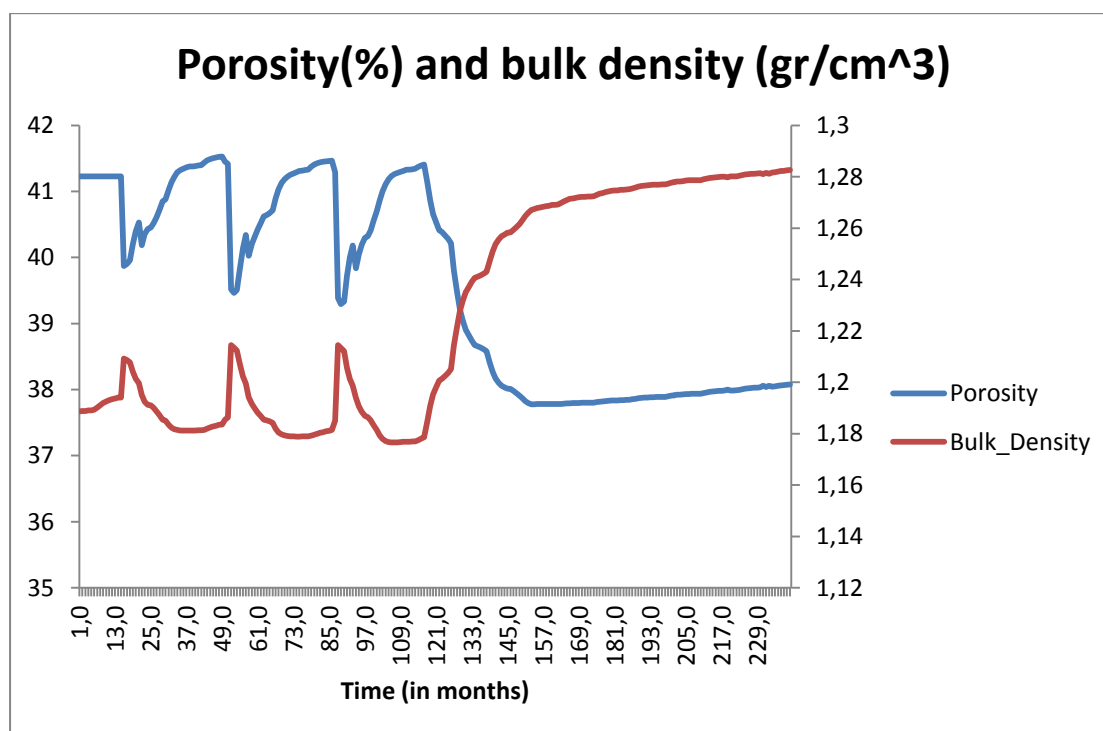
Γράφημα 10-19 Κατανομή αργίλου και ιλύος στα κλάσματα (3^ο χωράφι)



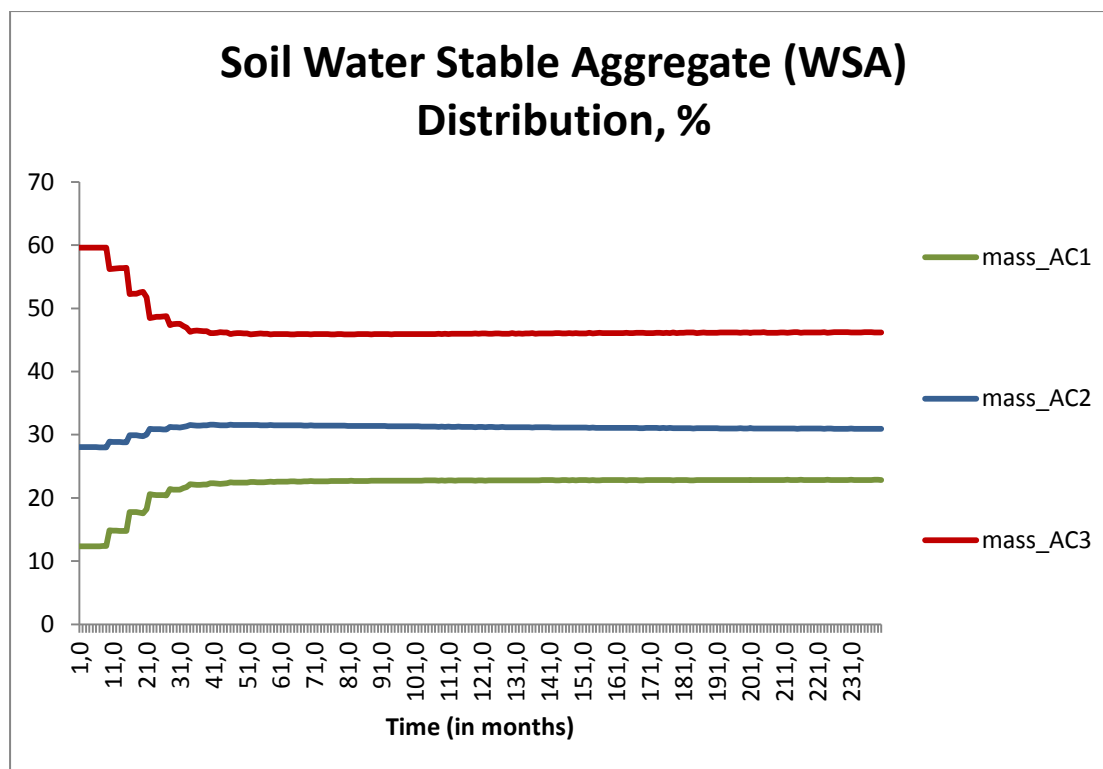
Γράφημα 10-20 Κατανομή οργανικού άνθρακα στην άργιλο και ιλύ (3^ο χωράφι)



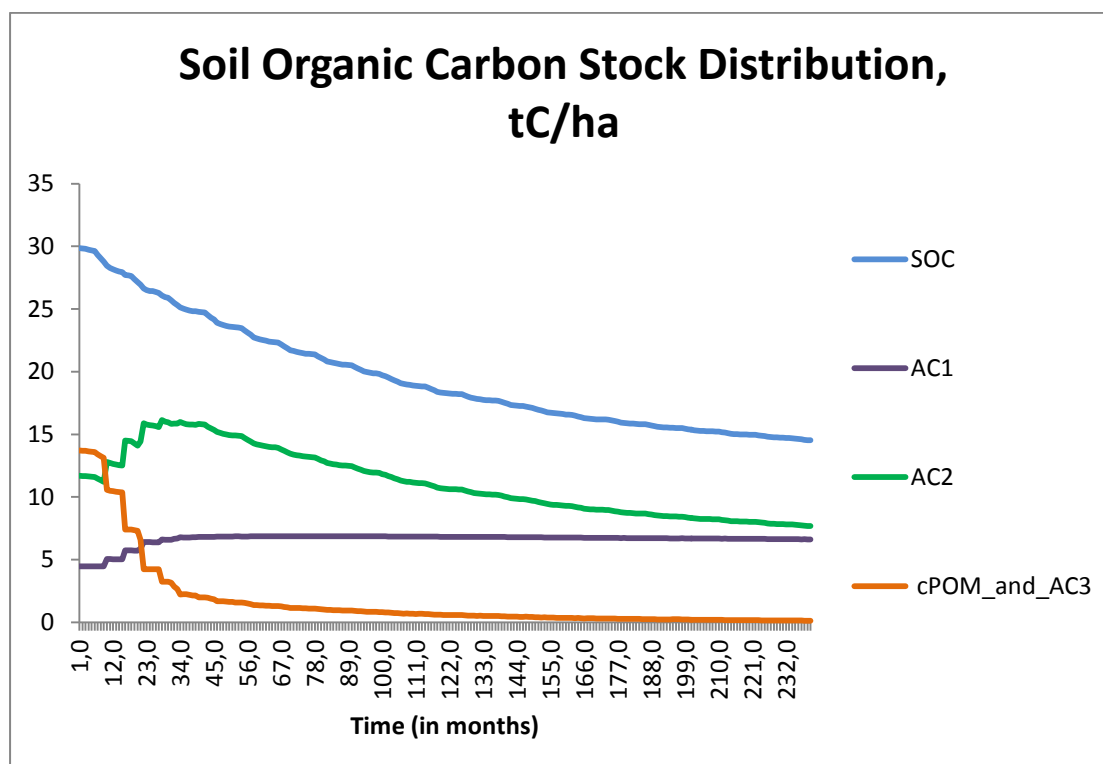
Γράφημα 10-21 Κατανομή οργανικού άνθρακα στα κλάσματα του AC3 (3^ο χωράφι)



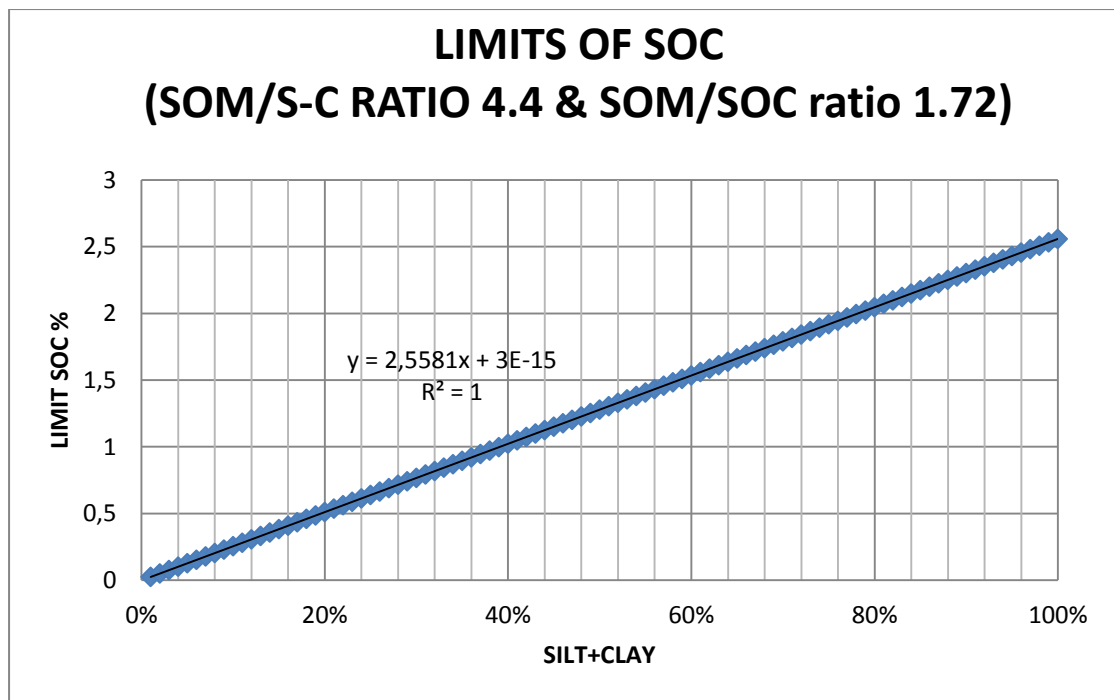
Γράφημα 10-22 Πορώδες και πυκνότητα εδάφους (3^ο χωράφι)



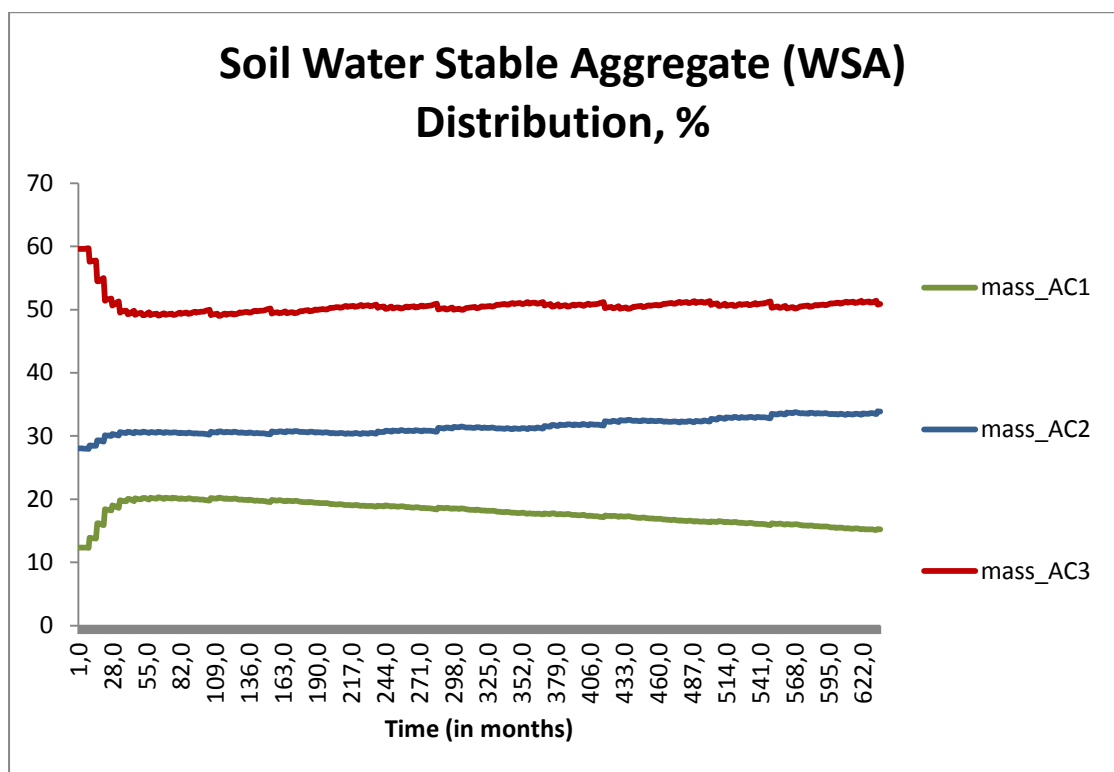
Γράφημα 10-23 Κατανομή WSA σε χωράφι χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού



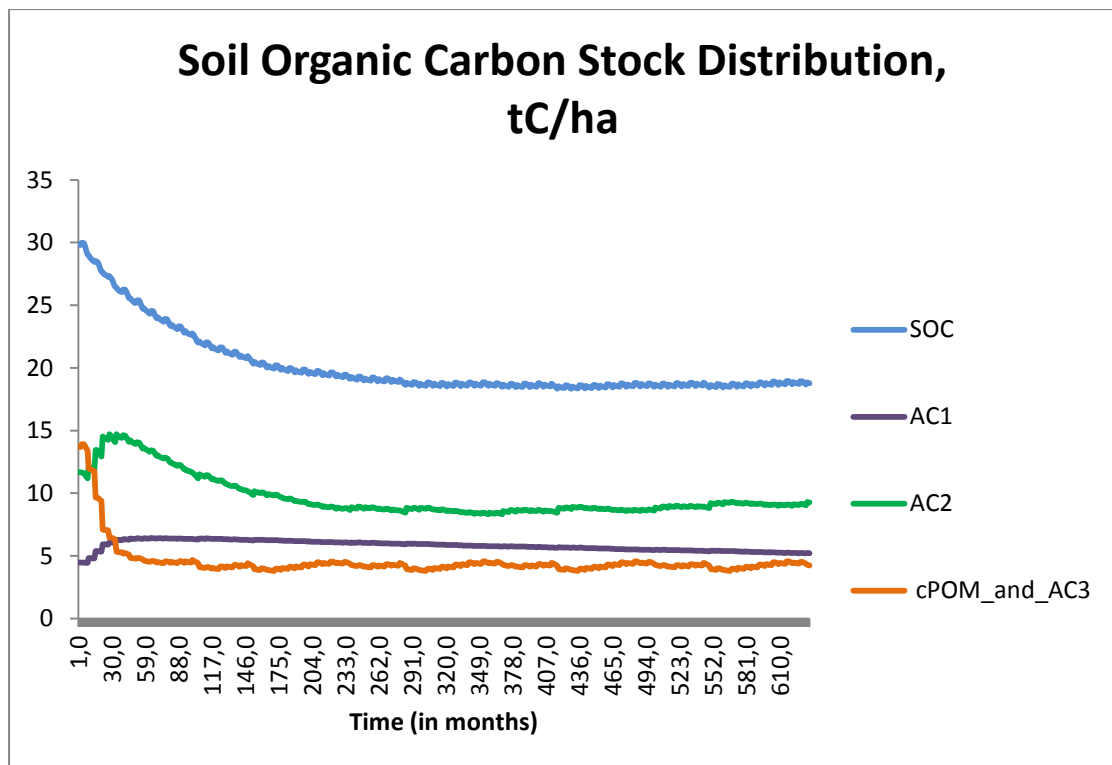
Γράφημα 10-24 Κατανομή του οργανικού άνθρακα σε χωράφι χωρίς προσθήκη εδαφοβελτιωτικού



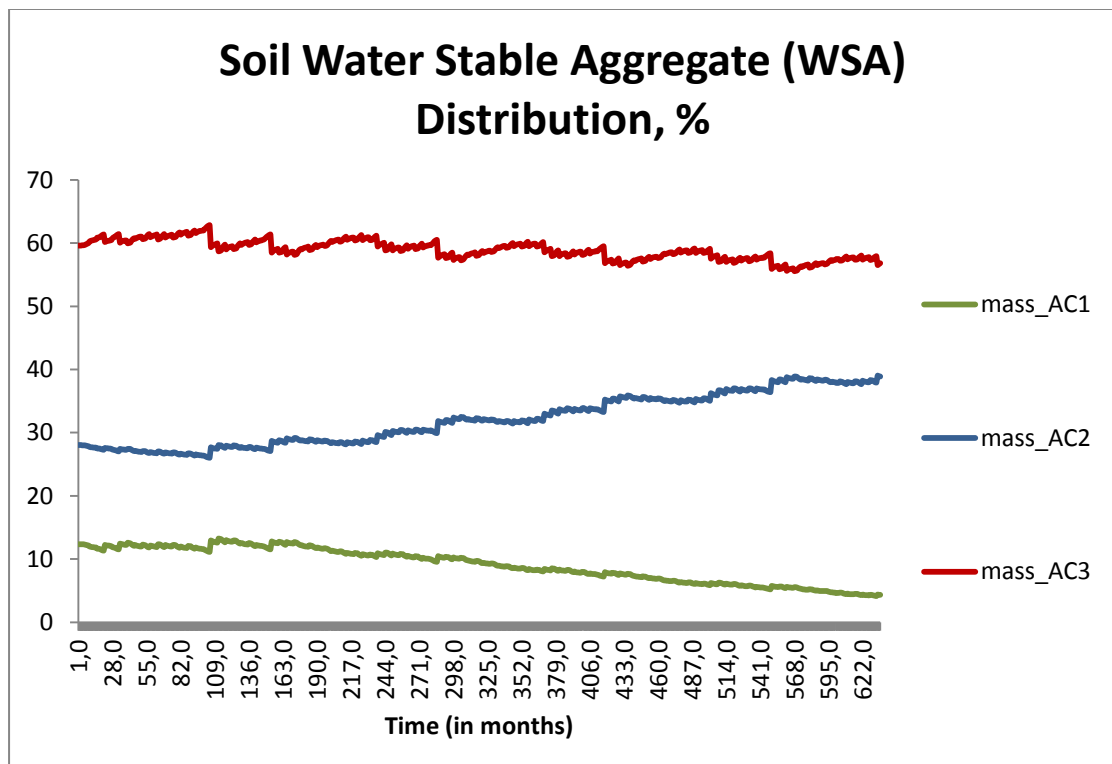
Γράφημα 10-25 Όρια SOC συναρτήσει του κλάσματος ιλύς-αργίλου



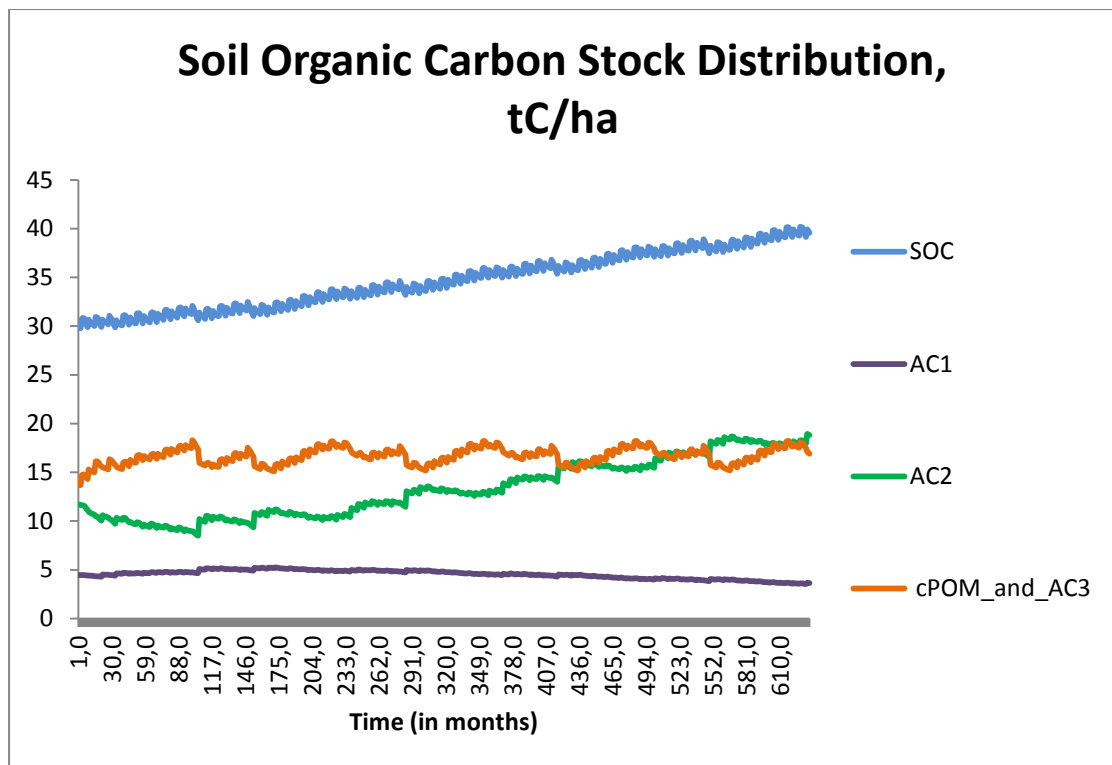
Γράφημα 10-26 Κατανομή συσσωματωμάτων, πρακτική διαχείρισης (0,6tn C/ha)



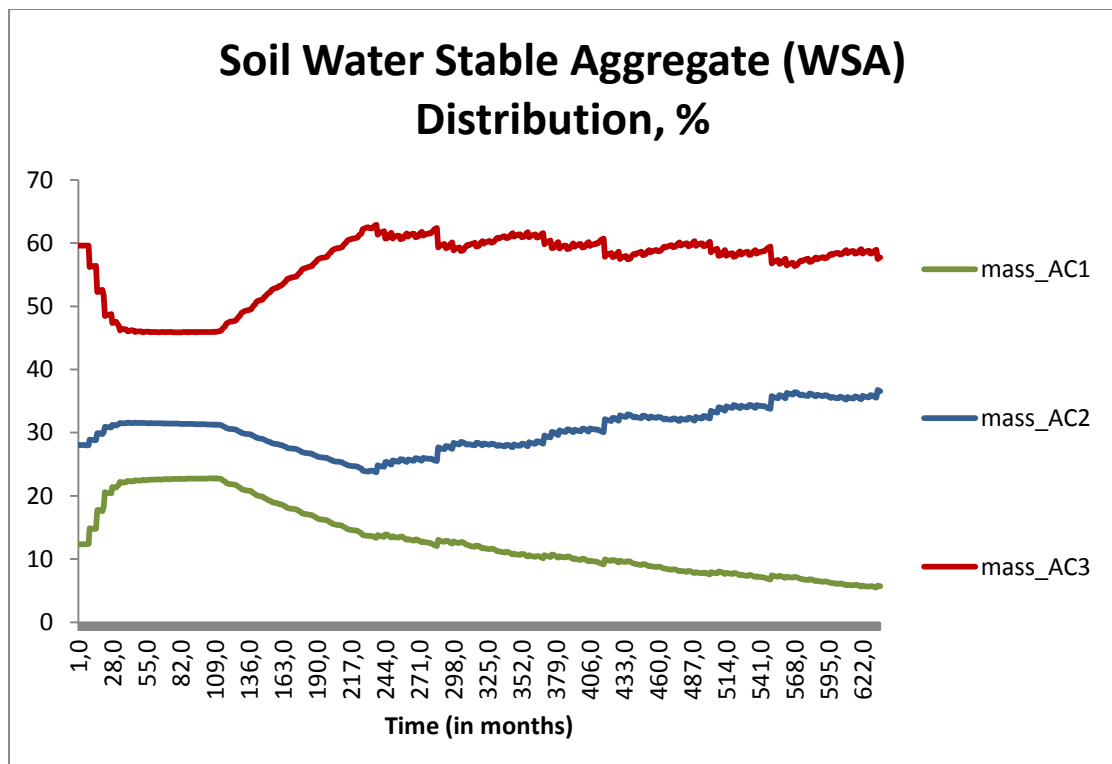
Γράφημα 10-27 Κατανομή οργανικού άνθρακα, πρακτική διαχείρισης (0,6tn C/ha)



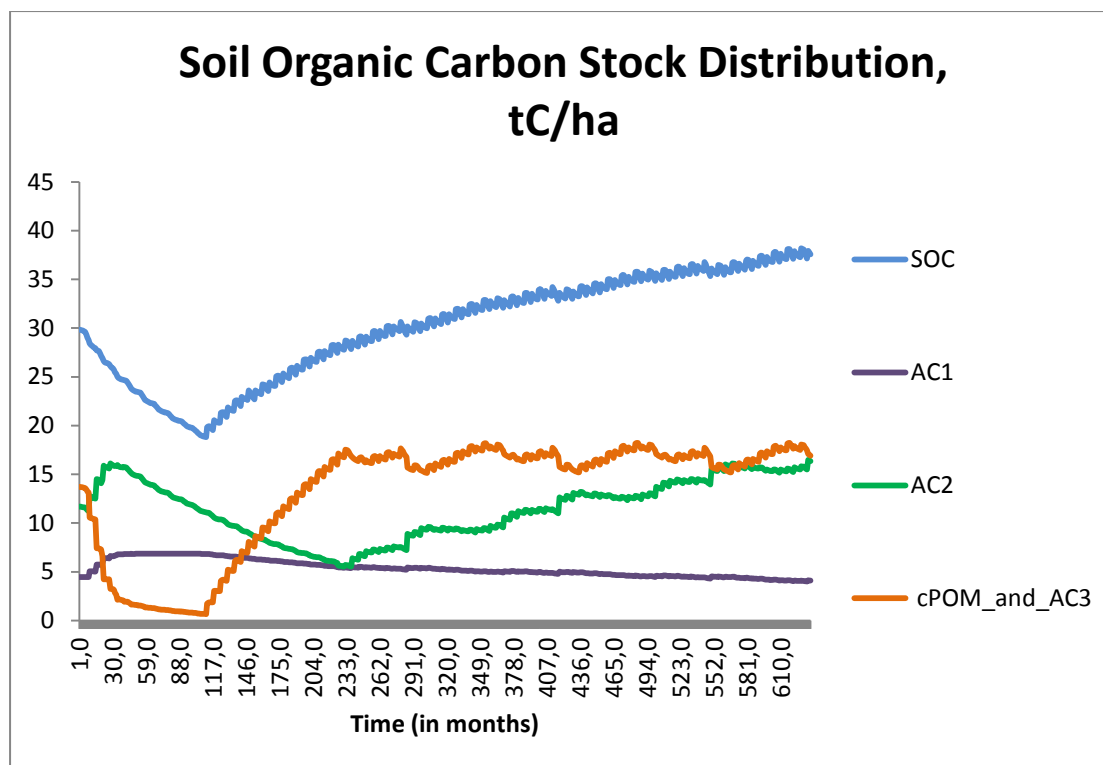
Γράφημα 10-28 Κατανομή συσσωματωμάτων, πρακτική διαχείρισης (2,4 tn C/ha)



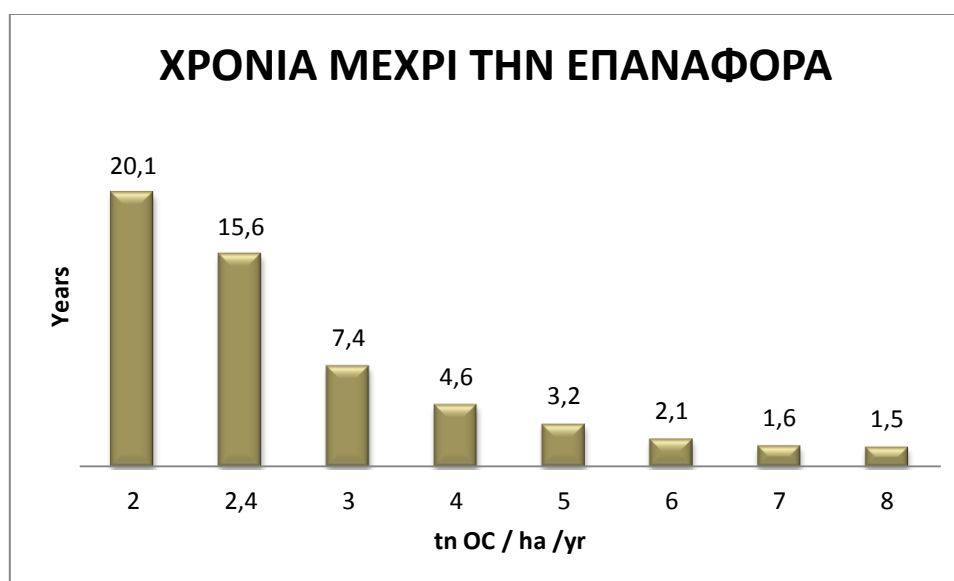
Γράφημα 10-29 Κατανομή οργανικού άνθρακα, πρακτική διαχείρισης (2,4 tn C/ha)



Γράφημα 10-30 Κατανομή συσσωματωμάτων, σενάριο επαναφοράς και διατήρησης κατάστασης εδάφους



Γράφημα 10-31 Κατανομή οργανικού άνθρακα, σενάριο επαναφοράς και διατήρησης κατάστασης εδάφους



Γράφημα 10-32 Αναγκαίοι μήνες μέχρι την επαναφορά την αρχική κατάσταση συναρτήσει της ποσότητας εδαφοβελτιωτικού που εισάγεται

tn OC /ha/yr	Μείωση %
3	52%
4	71%
5	80%
6	87%
7	90%
8	90%

Πίνακας 10-11 % μείωση χρόνου σε σχέση με 2,4 tn OC/ha/yr (τιμή διατήρησης)

Μεταβολή tn OC /ha	% μείωση χρόνου
2->2,4	22%
2,4->3	52%
3->4	38%
4->5	31%
5->6	34%
6->7	24%
7->8	5%

Πίνακας 10-12 Ποσοστό μείωσης χρόνου επαναφοράς συναρτήσει της μεταβολής του compost