



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΓΕΙΟΝΟΜΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ
ΕΔΑΦΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ
ΠΟΤΑΜΟΥ ΚΟΙΛΙΑΡΗ

ΣΩΤΗΡΙΑ ΠΑΝΑΚΟΥΛΙΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΝΙΚΟΛΑΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΧΑΝΙΑ
ΙΟΥΛΙΟΣ 2014

Στους γονείς μου

Κώστα και Αλέκα

Στον αδερφό μου

Χάρη

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή διατριβή ολοκληρώνει το δεύτερο κύκλο σπουδών που ακολούθησα στο Πολυτεχνείο Κρήτης. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικολαΐδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, τη βοήθεια που μου προσέφερε και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ στο κομμάτι αυτό της έρευνας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα λοιπά μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους καθηγητές κ. Καρατζά και κ. Παρανυχιανάκη, για το χρόνο που αφιέρωσαν στην ολοκλήρωση της διατριβής μου.

Σημαντική ήταν και η συμβολή των υπόλοιπων συναδέλφων του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών (H.E.R.S. lab) σε όλη την πορεία μου αυτά τα δύο χρόνια, τόσο ακαδημαϊκά όσο και ηθικά. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Μανώλη Κοτρωνάκη για τις πολύτιμες συμβουλές του και τους συναδέλφους Ευσταθίου Διονύση, Γιαννάκη Γιώργο, Λιλλή Μαρία και Νεραντζάκη Σοφία για την καθημερινή συμπαράσταση.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα SoilTrEC για τη χρηματοδότηση της ερευνητικής εργασίας που μου ανέθεσε και μέρος της οποίας αποτελεί και η παρούσα διατριβή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξημένη ζήτηση τροφίμων που αναμένεται στο μέλλον από τη συνεχή αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού, έχει καταστήσει τη γονιμότητα του εδάφους σε θέμα μείζονος σημασίας. Οι κλιματικές αλλαγές, οι εφαρμοζόμενες πρακτικές διαχείρισης και οι διάφορες μορφές ρύπανσης, έχουν οδηγήσει στη μείωση της αποδοτικότητας του εδάφους σε διάφορες περιοχές. Για το λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί μαθηματικά μοντέλα που προσομοιώνουν τη δομή και τις λειτουργίες του εδάφους, προκειμένου να εκτιμηθεί η κατάστασή τους και να βρεθούν λύσεις για τη βελτίωση της απόδοσής του. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή χρησιμοποιήθηκε ένα από αυτά τα μοντέλα, το μοντέλο CAST προκειμένου να προσομοιωθεί η λεκάνη απορροή του ποταμού Κοιλιάρη στην Κρήτη, μια περιοχή με έντονα υποβαθμισμένο έδαφος λόγω της εντατικής καλλιέργειας και υπερβόσκησης. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με τιμές άνθρακα και συσσωματωμάτων από δειγματοληψίες πεδίου. Το μοντέλο έβγαλε αποτελέσματα για προσομοίωση 60 ετών και εκτιμήθηκε η μελλοντική κατάσταση του εδάφους της περιοχής σε περίπτωση αγρανάπαυσης. Στη συνέχεια έγινε προσομοίωση για την περιοχή της Μηλιάς στην Κρήτη, που αντιπροσωπεύει ένα υποβαθμισμένο έδαφος στο οποίο έχουν εφαρμοστεί καλές πρακτικές διαχείρισης με χρήση εδαφοβελτιωτικών και εναλλαγή καλλιέργειας και αγρανάπαυσης για τη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους. Τέλος χρησιμοποιήθηκε η προσομοίωση του μοντέλου στη χρονοσειρά του Damma glacier της Ελβετίας, η οποία αναπαριστά τη δημιουργία νέων εδαφών καθώς αυτά αποκαλύπτονται από την υποχώρηση του παγετώνα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν μεταξύ τους και εξήχθησαν συμπεράσματα τόσο για τη δομή του εδάφους κάθε περιοχής όσο και για την αποτελεσματικότητα του μοντέλου.

ABSTRACT

The increased food demand expected in the future from the constant increasing of human population, has made the soil fertility a major issue. Climate change, implementation of management practices and various forms of pollution, have led to declining profitability of land in various locations. For this reason there have been created mathematical models that simulate soil structure and soil functions, in order to assess the situation and find solutions of soil performance. This thesis uses one of these models, CAST model, to simulate the Koiliaris River Basin in Crete, a strongly degraded soil due to intensive cultivation and over-grazing. The model was calibrated with carbon and aggregate values collected from field sampling. The model simulation was set for 60 years and the results were used for the estimation of future soil condition under fallow. Subsequently a field in Milia, Crete was simulated, which represents a degraded soil in which good management practices were applied, using soil improvers and crop rotation with fallow, in order to improve soil fertility. Finally, the simulation of the Damma Glacier, Switzerland chronosequence were used, because it represents the creation of new soils as they are revealed by the receding glacier. Simulation results were compared and conclusions were reached for both soil structure of each area and the effectiveness of the model.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΠΙΝΑΚΕΣ	7
ΣΧΗΜΑΤΑ	7
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ	8
ΕΙΚΟΝΕΣ	8
ΧΑΡΤΕΣ	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	13
ΔΟΜΗ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	13
ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΘΡΑΚΑ	21
ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΑ	23
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	30
ΜΟΝΤΕΛΟ CAST (COUPLED CARBON, AGGREGATION AND STRUCTURE TURNOVER)	37
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	42
ΚΟΙΛΙΑΡΗΣ.....	42
ΜΗΛΙΑ.....	49
DAMMA GLACIER.....	51
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ.....	56
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	59
ΚΟΙΛΙΑΡΗΣ.....	59
ΜΗΛΙΑ.....	62
DAMMA GLACIER.....	67
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	83
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	92

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Μηνιαίες τιμές εισροής φυτικού υπολείμματος στην περιοχή της Μηλιάς.....	51
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά περιοχών προσομοίωσης	56
Πίνακας 3: Παράμετροι βαθμονόμησης για σύγκριση αποτελεσμάτων	56
Πίνακας 4: Ροές άνθρακα - Κοιλιάρης.....	61
Πίνακας 5: Ροές άνθρακα - Μηλιά	66
Πίνακας 6: Ροές άνθρακα στη χρονοσειρά του Damma	71
Πίνακας 7: Σύγκριση ρυθμών αποσύνθεσης - Κοιλιάρης.....	71
Πίνακας 8: Σύγκριση μακρο-συσσωμάτωσης - Κοιλιάρης	72
Πίνακας 9: Σύγκριση σταθερών διάσπασης μακρο-συσσωματωμάτων - Κοιλιάρης.....	72
Πίνακας 10: Σύγκριση σταθερών ρυθμού - Κοιλιάρης-Μηλιά	73
Πίνακας 11: Σύγκριση ρυθμών αποσύνθεσης - Κοιλιάρης-Μηλιά.....	73
Πίνακας 12: Σύγκριση μακρο και μικρο συσσωμάτωσης - Κοιλιάρης-Μηλιά.....	74
Πίνακας 13: Σύγκριση σταθερών διάσπασης μακρο-συσσωματωμάτων - Κοιλιάρης-Μηλιά.....	75
Πίνακας 14: Σύγκριση σταθερών θρυμματισμού φυτικού υλικού - Damma.....	76
Πίνακας 15: Σύγκριση ρυθμών αποσύνθεσης φυτικού υλικού - Damma	76
Πίνακας 16: Σύγκριση σταθερών ρυθμού - Κοιλιάρης-Damma	77
Πίνακας 17: Σύγκριση ρυθμών αποσύνθεσης - Κοιλιάρης-Damma	77
Πίνακας 18: Σύγκριση μακρο και μικρο συσσωμάτωσης - Κοιλιάρης-Damma	78
Πίνακας 19: Σύγκριση σταθερών διάσπασης μακρο-συσσωματωμάτων - Κοιλιάρης-Damma.....	79
Πίνακας 20: Τιμές δείκτη λειτουργίας του εδάφους SOC/(silt+clay) στο τέλος της προσομοίωσης κάθε περιοχής.....	80
Πίνακας 21: Σύγκριση των τιμών του άνθρακα στο τέλος της προσομοίωσης με τις αντίστοιχες τιμές που ικανοποιούν το δείκτη λειτουργίας του εδάφους SOC/(silt+clay) για οριακή τιμή 4.5 και τιμή ασφαλείας 5.5.....	81
Πίνακας 22: Ποσοστό μακρο-συσσωματωμάτων κάθε περιοχής για αξιολόγηση αγρονομικής αξίας του εδάφους	81
Πίνακας 23: Ροές άνθρακα περιοχών προσομοίωσης	82

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1: Δομή του μοντέλου RothC (Coleman, K., Jenkinson, 1999).....	36
Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση της μακρο-συσσωμάτωσης (Stamati et al., 2013)	38
Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου εργασιών του άνθρακα και των συσσωματωμάτων στο μοντέλο CAST (Stamati et al., 2013)	39
Σχήμα 4: Κλασμάτωση κατά (Elliott, E.T., 1986).....	41
Σχήμα 5: Κατανομή υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων - Κοιλιάρης.....	59
Σχήμα 6: Κατανομή οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα - Κοιλιάρης	60
Σχήμα 7: Κατανομή αργίλου-ιλύος στα συσσωματώματα - Κοιλιάρης	61
Σχήμα 8: Πορώδες και φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους - Κοιλιάρης.....	62
Σχήμα 9: Κατανομή υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων - Μηλιά	64
Σχήμα 10: Κατανομή οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα - Μηλιά.....	65
Σχήμα 11: Κατανομή αργίλου-ιλύος στα συσσωματώματα - Μηλιά	65
Σχήμα 12: Πορώδες και φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους - Μηλιά	66
Σχήμα 13: Κατανομή υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων - Damma	67

Σχήμα 14: Κατανομή οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα - Damma	68
Σχήμα 15: Κατανομή αργίλου-ιλύος στα συσσωματώματα - Damma	69
Σχήμα 16: Πορώδες και φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους - Damma	69

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

Διάγραμμα 1: Σχέση μεταξύ παραγόντων μετατόπισης εδαφικού οικοσυστήματος και εδαφικών λειτουργιών και απειλών (Nikolaidis, 2011).....	14
Διάγραμμα 2: Παραγωγικότητα χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη	48
Διάγραμμα 3: Εδαφικός οργανικός άνθρακας - Μηλιά	63
Διάγραμμα 4: Εδαφικός οργανικός άνθρακας διαφορετικών περιόδων - Μηλιά.....	63
Διάγραμμα 5: Κατανομή οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα στη χρονοσειρά του Damma ..	70
Διάγραμμα 6: Κατανομή υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων στη χρονοσειρά του Damma.....	70
Διάγραμμα 7: Σύγκριση ροών άνθρακα περιοχών προσομοίωσης	82

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1: Κύκλος ζωής του εδάφους (Banwart et al., 2011).....	11
Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση της κρίσιμης ζώνης του εδάφους (Stamati, 2012).....	13
Εικόνα 3: Ο χρόνος ημίσειας ζωής της Ε.Ο.Υ. προσδιορίζεται από την ισορροπία μεταξύ εισροών και εκροών. Η ολική Ε.Ο.Υ. αποτελείται από διάφορες δεξαμενές που αποσυντίθενται με διαφορετικού ρυθμούς. Ο μέσος χρόνος παραμονής (MRT) της Ε.Ο.Υ. είναι μια συνάρτηση των ρυθμών αποσύνθεσης των δεξαμενών που την απαρτίζουν. (J Six & Jastrow, 2002).....	22
Εικόνα 4: Κύκλος των μακρο-συσσωματωμάτων: διεργασία σχηματισμού και καταστροφής τους (Grandy & Neff, 2008).....	26
Εικόνα 5: Το εννοιολογικό μοντέλο του 'κύκλου ζωής' των μακρο-συσσωματωμάτων παρουσιάζει το σχηματισμό των νέων μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα και τη συσσώρευση σε σχέση με την ανοργανοποίηση του οργανικού άνθρακα των συσσωματωμάτων. Καθώς ο κύκλος εργασιών της συσσωμάτωσης λαμβάνει χώρα, ένα συσσωμάτωμα σχηματίζεται και σταθεροποιείται γύρω από ΣΟΥ επιστρωμένη με μικροβιακά παράγωγα και στη συνέχεια γίνεται ασταθές λόγω της διακοπής της μικροβιακής δραστηριότητας και τελικά διασπάται. Διατάραξη όπως το όργωμα ενισχύει τον κύκλο εργασιών των μακρο-συσσωματωμάτων και περιορίζει το σχηματισμό νέων μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα και την προστασία της ΕΟΥ σε αυτά τα μικρο-συσσωματώματα (J Six, Paustian, Elliott, & Combrink, 2000).	34
Εικόνα 6: Λεκάνη απορροής ποταμού Κοιλιάρη (Google Maps)	43
Εικόνα 7: Θέση Μηλιάς στο χάρτη και απόσταση από τη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη (Google Maps)	50
Εικόνα 8: Σημείο δειγματοληψίας Μηλιάς (BABΛΑΣ, 2013)	50
Εικόνα 9: Θέση Damma Glacier (Google Maps)	52
Εικόνα 10: Θέση όλων των περιοχών προσομοίωσης (Google Maps).....	53
Εικόνα 11: Θέση των σημείων δειγματοληψίας στο πεδίο Damma Glacier, με τις εκτιμήσεις της ηλικίας με βάση την ιστορία υποχώρησης των παγετώνων (Bernasconi et al., 2011).....	54
Εικόνα 12: Νέα εδάφη - Εδάφη ενδιάμεσης ηλικίας - Εδάφη μεγάλης ηλικίας Damma Glacier	54

ΧΑΡΤΕΣ

Χάρτης 1: Γεωλογικοί σχηματισμοί, χρήσεις γης, υδρολογική ροή και ροή θρεπτικών στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Stamati, 2012).....	44
---	----

Χάρτης 2: Ταξινόμηση της χαρτογράφησης του περιγράμματος του υψομέτρου (τα ψηφιακά δεδομένα που τέθηκαν έχουν προέλθει από τη βάση δεδομένων της περιοχής της Κρήτης - Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Stamati, 2012).....	45
Χάρτης 3: Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη.....	46
Χάρτης 4: Παραγωγικότητα χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη	47

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μέχρι το 2030, ο ανθρώπινος πληθυσμός προβλέπεται να ξεπεράσει τα 8,3 δισ., με μια ταυτόχρονη αύξηση της τάξης του 50% σε απαιτήσεις τροφής και καυσίμων και της τάξης του 30% σε απαιτήσεις πόσιμου νερού, ενώ ταυτόχρονα προσαρμόζεται στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Ως μια σημαντική αναπτυξιακή πολιτική για την αντιμετώπιση αυτών των απειλών, το 2007, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε τη Θεματική Στρατηγική για την Προστασία του Εδάφους που είχε ως στόχο να προσδιορίσει την ανάγκη αντιμετώπισης των απειλών του εδάφους και των λειτουργιών που αυτό προσφέρει στο οικοσύστημα.

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού, συνεπάγεται συνεχή αύξηση των απαιτήσεων τροφής η οποία οδηγεί στην αύξηση των αναγκών για παραγωγή πρωτογενών προϊόντων. Τα τελευταία χρόνια όμως, η εντατικοποίηση της αγροτικής παραγωγής, οδήγησε στην υποβάθμιση των εδαφών. Η υποβάθμιση έγκειται στην απώλεια του οργανικού υλικού του εδάφους και στη μείωση της γονιμότητάς του. Στόχος είναι η μελέτη του εδάφους και των πρακτικών διαχείρισης, ώστε να καθίσταται ικανό να παρέχει τους πόρους που απαιτούνται για την κάλυψη των ανθρώπινων αναγκών στο παρόν και να τις διασφαλίζει για το μέλλον.

Η γονιμότητα του εδάφους είναι ουσιαστικά η ικανότητα του εδάφους να υποστηρίζει την ανάπτυξη φυσικών οικοσυστημάτων. Τα οικοσυστήματα είναι σύνθετα συστήματα που περιγράφουν τις αλληλεπιδράσεις των ζωντανών οργανισμών με το αβιοτικό περιβάλλον. Η ανάπτυξη των φυτών στο έδαφος προϋποθέτει το δεύτερο να έχει την κατάλληλη λειτουργική δομή, ώστε να παρέχει όλα τα απαιτούμενα στοιχεία (θρεπτικά, ιχνοστοιχεία κλπ) και τις απαραίτητες συνθήκες για τις φυτικές λειτουργίες. Για το λόγο αυτό σε πολλές περιπτώσεις, εφαρμόζονται λιπάσματα στο έδαφος ώστε να το εμπλουτίζουν με τα κατάλληλα στοιχεία που θα το οδηγήσουν σε μια πιο γόνιμη κατάσταση με σκοπό την ανάπτυξη καλλιεργειών.

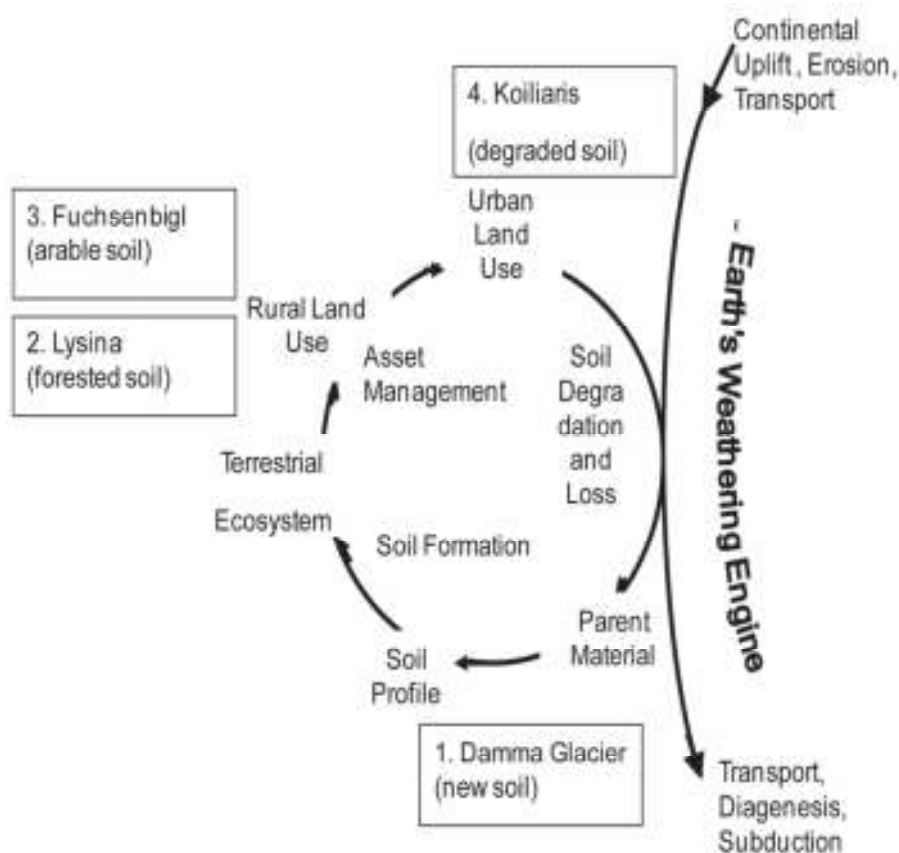
Οι εντατικές καλλιεργητικές πρακτικές που εφαρμόζονται μέχρι και σήμερα, όπως το βαθύ όργωμα, οδηγούν στην καταστροφή της δομής του εδάφους, με αποτέλεσμα το βιοδιαθέσιμο οργανικό υλικό που προστατεύεται στις μικροδομές του, να καταναλώνεται από τους αποδομητές, ενώ παράλληλα εμποδίζεται η κυκλοφορία του νερού και του οξυγόνου στο έδαφος με αποτέλεσμα τη μείωση της λειτουργικότητας και αποδοτικότητάς του. Είναι απαραίτητο οι καλλιεργητικές πρακτικές να καταστούν βιώσιμες, ώστε να διατηρείται η γονιμότητα του εδάφους χωρίς την υπέρμετρη χρήση λιπασμάτων η οποία αποκλείεται σε περιπτώσεις ακραίας υποβάθμισης (ερημοποίηση).

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος είναι απαραίτητη η μελέτη της κατάστασης του εδάφους σε ότι αφορά το διαθέσιμο οργανικό υλικό, το οποίο αποτελεί σημαντικό δομικό και λειτουργικό συστατικό του εδάφους, ώστε να εκτιμηθούν οι τρόποι με τους οποίους θα επιτευχθεί η αειφορία στη λειτουργία του εδάφους και τις αγροτικές πρακτικές. Σε αυτά τα πλαίσια έχουν αναπτυχθεί μοντέλα τα οποία προσομοιάζουν τη δομή και λειτουργία του εδάφους. Με τη χρήση των μοντέλων αυτών, είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την κατάσταση του εδάφους και να προβλέψουμε τη μελλοντική εξέλιξη της κατάστασής του κάτω από διάφορες συνθήκες οι οποίες δύναται να αφορούν κλιματικές αλλαγές, αλλαγές στις χρήσεις γης, αλλαγές στις γεωργικές πρακτικές κλπ.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος SoilTrEC (Soil Transformations in European Catchments) χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission) με σκοπό την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών αλλαγών στις βασικές λειτουργίες του εδάφους (Menon et al., 2014).

Οι επιπτώσεις των μη βιώσιμων πρακτικών που εφαρμόζονται στο έδαφος, τείνουν να το υποβαθμίζουν με ρυθμούς πολύ μεγαλύτερους από τους ρυθμούς σχηματισμού του (Banwart et al., 2011). Ως αποτέλεσμα το έδαφος καθίσταται σαν περιορισμένος πόρος. Η θεματική στρατηγική για την προστασία των εδαφών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU Thematic Strategy of Soil Protection) ορίζει την προτεραιότητα της διασφάλισης των λειτουργιών του εδάφους. Σε αυτό περιλαμβάνεται η κατανόηση χημικών, βιολογικών και φυσικών διαδικασιών που καθορίζουν την κατάσταση του εδάφους, καθώς και η κατανόηση και ποσοτικοποίηση των οικολογικών, κοινωνικών και οικονομικών επακόλουθων των εδαφικών απειλών και τις επιπτώσεις των περιβαλλοντικών αλλαγών στις υπηρεσίες του οικοσυστήματος (Banwart et al., 2011).

Σκοπός είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου που θα περιγράφει και θα ποσοτικοποιεί τις διαδικασίες και λειτουργίες του εδάφους, από τις βασικές αρχές της χημείας, της φυσικής και της οικολογίας (Menon et al., 2014). Για το λόγο αυτό άρχισε η μελέτη της δομής του εδάφους και του σχηματισμού εδαφικών συσσωματωμάτων σε τέσσερα ευρωπαϊκά παρατηρητήρια της κρίσιμης ζώνης του εδάφους (CZO – Critical Zone Observatories) (Banwart et al., 2011). Η επιλογή των παρατηρητηρίων για τον πειραματικό σχεδιασμό έγινε ώστε να αντανakλάται ο κύκλος ζωής του εδάφους σε διαφορετικά στάδια (Εικόνα 1),



Εικόνα 1: Κύκλος ζωής του εδάφους (Banwart et al., 2011)

1. Το παρατηρητήριο του Damma Glacier στην Ελβετία, επιτρέπει τη μελέτη του σχηματισμού του εδάφους καθώς ο παγετώνας υποχωρεί και εκθέτει το υποκείμενο μητρικό πέτρωμα. Μια χρονοσειρά 170 χρόνων επιτρέπει την παρατήρηση του σχηματισμού του εδάφους στα αρχικά στάδια
2. Το παρατηρητήριο του Fuchsenbigl στην Αυστρία, επιτρέπει τη μελέτη των διαδικασιών του εδάφους κατά τη διάρκεια διαχείρισης της αρόσιμης γης για γεωργική παραγωγή.
3. Το παρατηρητήριο στη Lyssina της Τσεχίας, επιτρέπει τη μελέτη των διαδικασιών του εδάφους κατά τη διάρκεια διαχείρισης δασικών χρήσεων γης για εντατική δασοπονία.
4. Το παρατηρητήριο του Κοιλιάρη της Ελλάδας, επιτρέπει τη μελέτη έντονα υποβαθμισμένου εδάφους λόγω της εντατικής καλλιέργειας και υπερβόσκησης, το οποίο απειλείται με ερημοποίηση λόγω των σύγχρονων κλιματικών αλλαγών.

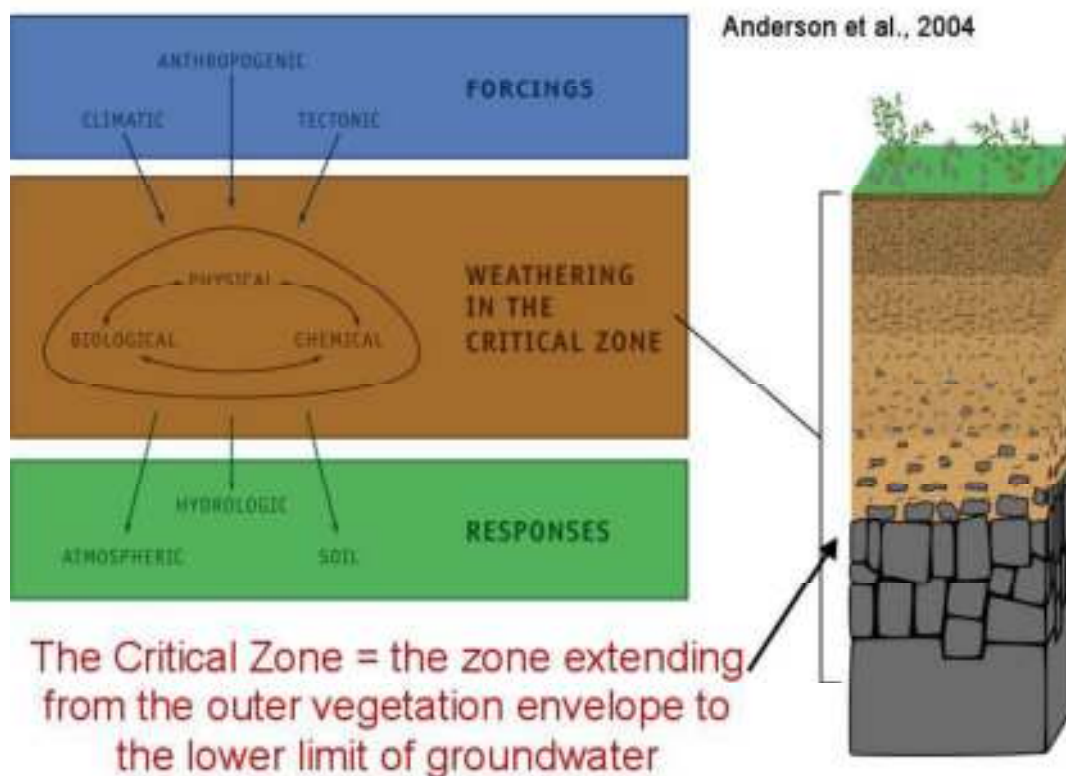
Σκοπός είναι τα μαθηματικά μοντέλα να στηριχτούν όσο το δυνατό περισσότερο στις βασικές αρχές, ώστε η επέκταση και εφαρμογή τους σε άλλες περιοχές υπό διαφορετικές συνθήκες, να μειώνει τους περιορισμούς στα εξαγόμενα συμπεράσματα (Banwart et al., 2011).

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής είναι η χρήση του μοντέλου CAST, το οποίο προσομοιώνει τη δομή και τη δέσμευση του άνθρακα του εδάφους, για την προσομοίωση σημείων διαφορετικής λιθολογίας στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Κρήτη). Στη συνέχεια τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα προσομοίωσης που έγιναν με το μοντέλο CAST για την περιοχή της Μηλιάς (Κρήτη) και την περιοχή του παγετώνα Damma (Ελβετία). Η περιοχή του Κοιλιάρη αντιπροσωπεύει τα υποβαθμισμένα εδάφη, η περιοχή της Μηλιάς αντιπροσωπεύει εδάφη άγονα τα οποία καλλιεργούνται με προσθήκη εδαφοβελτιωτικών, ενώ η περιοχή του Damma αντιπροσωπεύει τα πρώτα στάδια δημιουργίας των νέων εδαφών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΔΟΜΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η κρίσιμη ζώνη του εδάφους ορίζεται σαν το ανώτερο τμήμα του γήινου περιβλήματος, που εκτείνεται από το μητρικό πέτρωμα έως την κορυφή της βλάστησης (Εικόνα 2) (Stamati, 2012). Το έδαφος ορίζεται ως το ανώτερο τμήμα, μεταξύ του μητρικού πετρώματος και της γήινης επιφάνειας, χωρίς τη ζώνη του υπεδάφιου ύδατος. Αποτελεί τη δεύτερη σημαντικότερη φυσική πηγή, μετά το νερό, όπου συντελούνται σημαντικές περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές λειτουργίες (Blum, 2005).

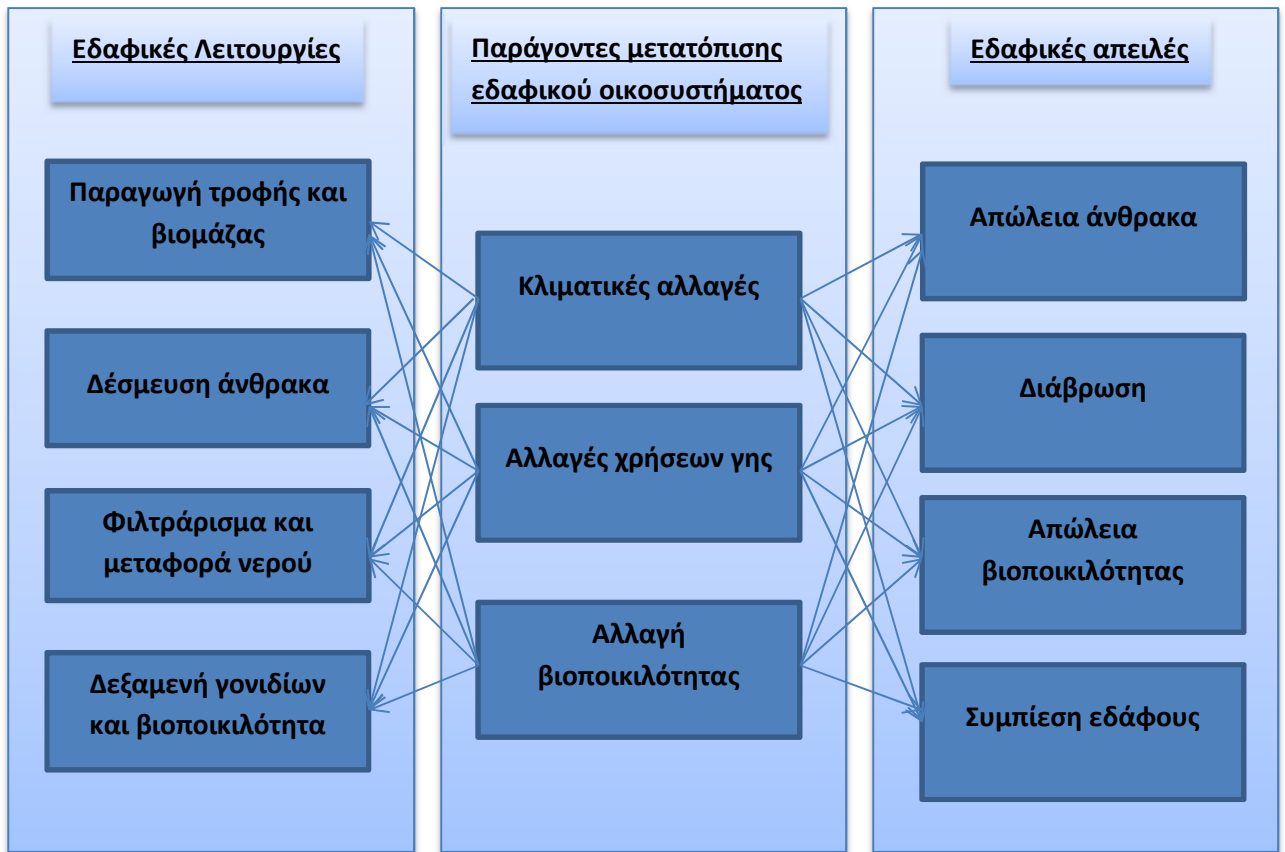


Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση της κρίσιμης ζώνης του εδάφους (Stamati, 2012)

Λειτουργίες του εδάφους

Οι λειτουργίες του εδαφικού οικοσυστήματος (παραγωγή τροφής και βιομάζας, βιοποικιλότητα, δέσμευση άνθρακα, πρώτες ύλες και τοπίο, κληρονομιά) προέρχονται από τις δυναμικές δράσεις των φυτών, των ζώων, των μικροοργανισμών και του αβιοτικού περιβάλλοντος που λειτουργούν σαν ενότητα. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν επηρεάσει τις λειτουργίες του εδάφους και σε πολλές περιπτώσεις έχουν οδηγήσει στην κατάρρευση του εδαφικού οικοσυστήματος (Nikolaidis, 2011).

Η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού πιέζει για αύξηση της παραγωγής τροφίμων με αποτέλεσμα τη μέγιστη χρήση λιπασμάτων. Η επέκταση των οριακών περιοχών από την αύξηση της παραγωγής, οδηγεί στο να ενταθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (μείωση του εδαφικού άνθρακα, μείωση της βιοποικιλότητας, απώλεια της γονιμότητας, συμπίεση, κλπ).



Διάγραμμα 1: Σχέση μεταξύ παραγόντων μετατόπισης εδαφικού οικοσυστήματος και εδαφικών λειτουργιών και απειλών (Nikolaïdis, 2011)

Οι μεταβολές στα εδαφικά οικοσυστήματα είναι απότομες αλλαγές που έχουν μακροχρόνιες επιπτώσεις στο φυσικό τοπίο και στη βιοτική και αβιοτική δομή του εδάφους. Το χρονικό σημείο κατά το οποίο το οικοσύστημα μετατοπίζεται από μία κατάσταση σε μια άλλη ονομάζεται σημείο καμπής (tipping point).

Οι μεταβολές αυτές συμβαίνουν λόγω διάφορων παραγόντων όπως οι κλιματικές αλλαγές, οι αλλαγές στις χρήσεις γης, η χρήση λιπασμάτων και η μείωση της βιοποικιλότητας στην επιφάνεια του εδάφους (Nelson et al., 2006).

Στο Διάγραμμα 1 φαίνονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων μεταβολής του εδαφικού οικοσυστήματος με τις λειτουργίες του εδάφους και τις εδαφικές απειλές.

Είναι σημαντικό το εδαφικό οικοσύστημα να αναγνωριστεί σαν ένα ευφυές σύστημα όπου όλα τα συστατικά του μέρη ενεργούν ως μια μονάδα και όχι να αντιμετωπίζεται σαν μέρος ενός υπολογισμού των διάφορων στοιχείων του περιοδικού πίνακα (Nikolaïdis, 2011). Η υπέργεια βλάστηση παρέχει οργανικά υπολείμματα ως τροφή στους υπεδάφιους μικροοργανισμούς, καθορίζοντας με τον τρόπο αυτό τη δομή της μικροβιακής κοινότητας. Με τη σειρά τους, οι υπεδάφιοι μικροοργανισμοί καθορίζουν τη διαθεσιμότητα και διατροφή της βλάστησης. Αυτές οι αμφίδρομες αλληλεπιδράσεις συμμετέχουν στην ανάπτυξη της δομής και των λειτουργιών του εδάφους (Nikolaïdis, 2011).

Η επιφανειακή κρούστα είναι μια επικίνδυνη πτυχή της υποβάθμισης του εδάφους. Σχηματίζεται κυρίως από τα φαινόμενα βροχόπτωσης. Προκαλεί τη μείωση του πορώδους του εδάφους, αυξάνοντας την απορροή ενώ ταυτόχρονα το συμπαγές αυτό στρώμα περιέχει μερικούς μεγάλους πόρους που διοχετεύουν το νερό κατακόρυφα στο υπέδαφος.

Οι σύγχρονες αγροτικές πρακτικές εντείνουν τις εδαφικές απειλές, οι οποίες με τη σειρά τους επιβαρύνουν τη γονιμότητα του εδάφους. Σαν συνέπεια αυξάνεται η ευαισθησία του εδάφους στην ερημοποίηση, απειλείται η βιώσιμη ανάπτυξη, με παγκόσμιες συνέπειες στη διασφάλιση των τροφίμων, την ποιότητα του νερού και την οικονομία.

Οι ρυθμοί διάβρωσης του εδάφους στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις είναι δυο με τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτεροι από τους αντίστοιχους ρυθμούς σχηματισμού του εδάφους (Stamati, 2012). Παράλληλα, τα επόμενα χρόνια, αναμένεται να αυξηθούν οι πιέσεις στις λειτουργίες του εδάφους λόγω των κλιματικών αλλαγών και της αύξησης των απαιτήσεων σε τρόφιμα, βιοκαύσιμα και ξυλεία (Richardson, 2010). Για το λόγο αυτό πρέπει να επανεκτιμηθούν οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται στη γεωργία και να αναπτυχθούν εναλλακτικές πρακτικές διαχείρισης, που θα ενσωματώνουν βιώσιμες πρακτικές οι οποίες θα προστατεύουν τα εδάφη.

Η δομή του εδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα στις λειτουργίες του εδάφους, στην ικανότητά του να υποστηρίζει τη χλωρίδα και την πανίδα, στην ικανότητά του να συγκρατεί την ποιότητα του περιβάλλοντος με έμφαση στη δέσμευση εδαφικού άνθρακα και την ποιότητα του νερού. Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων χρησιμοποιείται σαν δείκτης της δομής του εδάφους (J Six, Elliott, & Paustian, 2000). Η συσσωμάτωση είναι το αποτέλεσμα της αναδιάταξης των σωματιδίων, της κροκίδωσης και της συγκόλλησης. Η σταθερότητα και ο κύκλος εργασιών (σχηματισμός/διάσπαση) των συσσωματωμάτων εδαφικών σωματιδίων, παίζουν καταλυτικό ρόλο στη διάβρωση του εδάφους, στον κύκλο των θρεπτικών και τη γονιμότητα του εδάφους (Nikolaïdis & Bidoglio, 2013).

Η εξασθένηση της δομής του εδάφους θεωρείται ως μια μορφή της υποβάθμισης του εδάφους και συχνά σχετίζεται με τις χρήσεις γης και τις πρακτικές διαχείρισης του εδάφους και των καλλιεργειών. Η δομή του εδάφους επηρεάζει την κίνηση και κατακράτηση του εδαφικού ύδατος, τη διάβρωση, την ξήρανση, την ανακύκλωση των θρεπτικών, τη διείσδυση των ριζών και την απόδοση των καλλιεργειών. Εξωτερικοί παράγοντες όπως η απορροή, η ρύπανση υπόγειων και επιφανειακών νερών και οι εκπομπές CO₂ επηρεάζονται από τη δομή του εδάφους. Η βιοποικιλότητα των ειδών επηρεάζεται από τις πρακτικές διαχείρισης και μάλιστα οι αγροτικές πρακτικές μεγάλων εισροών μειώνουν τη βιοποικιλότητα, ενώ οι αγροτικές πρακτικές χαμηλών εισροών την ενισχύουν (Bronick & Lal, 2005).

Η δομή του εδάφους αναφέρεται στο μέγεθος, το σχήμα και τη διάταξη των στερεών και των κενών, τη συνέχεια των πόρων και των κενών, την ικανότητά τους να συγκρατούν και να διαβιβάζουν υγρά, οργανικές και ανόργανες ενώσεις καθώς και την ικανότητα να υποστηρίζουν ισχυρή ανάπτυξη ριζικού συστήματος (Rattan Lal, 1991). Η ευνοϊκή δομή του εδάφους και η υψηλή σταθερότητα των συσσωματωμάτων είναι μεγάλης σημασίας για τη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους, αυξάνοντας την αγροτική παραγωγικότητα, ενισχύοντας το πορώδες και μειώνοντας τη διάβρωση.

Εδαφογενείς διαδικασίες

Ο δομικός σχηματισμός του εδάφους και η συσσωμάτωση συμβαίνουν στο πλαίσιο των φυσικών εδαφογενών διαδικασιών και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Η σύνθετη διαδικασία προσθηκών και απωλειών από το έδαφος, οι δράσεις των οργανισμών και οι κλιματικές επιδράσεις καθορίζουν τις ιδιότητες του εδάφους. Η διάβρωση αλλάζει τα υλικά, τα οποία μετατοπίζονται μέσα στο έδαφος μέσω της έκπλυσης και διαφόρων φαινομένων μεταφοράς με τη βοήθεια της υγρής φάσης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό εδαφικής στρωμάτωσης (Bronick & Lal, 2005).

Εδαφική δομή και φυτική ανάπτυξη

Η δομή του εδάφους επιδρά στην ανάπτυξη των φυτών με το να επηρεάζει την κατανομή των ριζών και την ικανότητά τους να απορροφούν νερό και θρεπτικά (Rampazzo, Blum, & Wimmer, 1998). Η δομή του εδάφους διευκολύνει τη διεύθυνση οξυγόνου και νερού και μπορεί να βελτιώσει την αποθήκευση νερού (Franzluebbers, 2002). Η αυξημένη μεταφορά νερού στο έδαφος μπορεί να μειώσει την κατακράτηση λιπασμάτων και την αποδοτικότητα της χρήσης τους στα φυτά (Franzluebbers, 2002). Η διατάραξη του εδάφους μέσω της συμπίεσης ή του οργώματος μπορεί να οδηγήσει σε ραγδαία ανακύκλωση των θρεπτικών, σε ξήρανση και σε μειωμένη διαθεσιμότητα νερού και αέρα για τις ρίζες.

Κλίμα

Το κλίμα και η τοπογραφική θέση επηρεάζουν τη δομή του εδάφους με παράγοντες όπως η θερμοκρασία, οι κατακρημνίσεις, το υψόμετρο και οι εδαφικές κλίσεις. Οι εδαφικές ιδιότητες όπως η υφή, η ορυκτολογία, ο εδαφικός οργανικός άνθρακας και οι οργανισμοί μετριάζουν την επίδραση του κλίματος (Bronick & Lal, 2005).

Ανάγλυφο

Η γεωγραφική θέση, το υψόμετρο και οι κλίσεις επηρεάζουν σημαντικά τη βλάστηση και τη διάβρωση. Το υψόμετρο επηρεάζει το βαθμό της διάβρωσης, με έμμεσες επιπτώσεις στη δομή του εδάφους. Στα Μεσογειακά εδάφη, οι πλαγιές που βλέπουν προς το Βορρά παρουσιάζουν μεγαλύτερη συσσωμάτωση από αυτές που βλέπουν στο Νότο, πιθανότατα λόγω διαφορών στη βλάστηση και το μικροκλίμα (Boix-Fayos, Calvo-Cases, Imeson, Soriano-Soto, & Tiemessen, 1998). Η αύξηση της συσσωμάτωσης και της βλάστησης οδηγεί σε αύξηση της διήθησης και μείωση της διάβρωσης (Boix-Fayos et al., 1998). Τα επικλινή εδάφη είναι πιο επιρρεπή στη διάβρωση, ιδιαίτερα σε περιοχές με έντονη βροχόπτωση. Η διάβρωση τείνει να απομακρύνει κατά προτίμηση τα χαμηλής πυκνότητας και ελαφρά σωματίδια, συμπεριλαμβανομένων της αργίλου και του ΕΟΑ, τα οποία είναι δυο από τους κύριους συνδετικούς παράγοντες των συσσωματωμάτων. Η διάβρωση του ΕΟΑ μπορεί επίσης να αυξήσει το ποσοστό της ανοργανοποίησης (Jacinthe, Lal, & Kimble, 2002).

Ιδιότητες του εδάφους

Τύποι εδάφους

Η συσσωμάτωση επηρεάζεται από διαφορετικούς μηχανισμούς σε διαφορετικούς τύπους εδάφους. Ο ρυθμός και η σταθερότητα της συσσωμάτωσης γενικά αυξάνει με τον ΕΟΑ και την αργιλική επιφάνεια μιας περιοχής. Σε εδάφη με χαμηλό ΕΟΑ ή συγκέντρωση αργίλου, η συσσωμάτωση

ενισχύεται από κατιόντα, των οποίων ο ρόλος είναι ελάχιστος σε αντίθετη περίπτωση (Bronick & Lal, 2005).

Υφή

Η υφή του εδάφους επιδρά σημαντικά στη συσσωμάτωση. Σε αδρά εδάφη ο ΕΟΑ έχει μεγαλύτερη επίδραση στη δομή του εδάφους, ενώ με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άργιλο, το είδος και όχι η ποσότητα της αργίλου επηρεάζει τη συσσωμάτωση. Η περιεκτικότητα σε άργιλο επηρεάζει τη συσσωμάτωση μέσω της διόγκωσης και διασποράς. Κατά συνέπεια το δυναμικό της αποσυσσωμάτωσης λόγω διόγκωσης μειώνεται σε χαμηλά επίπεδα αργίλου (Bronick & Lal, 2005). Η αύξηση της συγκέντρωσης αργίλου επίσης σχετίζεται με την αυξημένη σταθεροποίηση του ΕΟΑ (Sollins, Homann, & Caldwell, 1996).

Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων

Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (ΙΑΚ) συχνά σχετίζεται με τα σταθερά συσσωματώματα. Η συσσωμάτωση ενισχύεται από την αλληλεπίδραση της πολυκατιοντικής γεφύρωσης στην οποία οι απωθητικές δυνάμεις μεταξύ αρνητικά φορτισμένης αργίλου και ΕΟΑ μειώνονται. Τα συσσωματώματα που διαθέτουν πολυσθενή κατιόντα είναι πιο ανθεκτικά στη διάσπαση (Bronick & Lal, 2005).

Εδαφικό pH

Το εδαφικό pH επηρεάζει εκτός της ανάπτυξης των φυτών, τη μικροβιακή δραστηριότητα, τη διαλυτότητα μεταλλικών ιόντων και τη διασπορά της αργίλου (Haynes & Naidu, 1998). Το αρνητικό φορτίο των αργιλικών σωματιδιακών επιφανειών ενισχύεται με το pH, αυξάνοντας τη σωματιδιακή απώθηση. Για το λόγο αυτό, η ρύθμιση του pH είναι σημαντική σε εδάφη με διεσπαρμένη άργιλο, καθώς τα αργιλικά σωματίδια συχνά κροκιδώνονται σε υψηλές τιμές pH. Τα μεγάλα συσσωματώματα σχηματίζονται σε εδάφη υψηλού pH και ανθρακικών (Boix-Fayos, Calvo-Cases, Imeson, & Soriano-Soto, 2001).

Πορώδες

Σε ένα καλά συσσωματωμένο έδαφος παρατηρείται ένα ευρύ φάσμα μεγέθους πόρων τόσο μεταξύ των συσσωματωμάτων, όσο και στο εσωτερικό τους (Bronick & Lal, 2005). Ο αριθμός, το μέγεθος και η απόσταση των πόρων μπορεί να επηρεάσουν τον ΕΟΑ και αντίστροφα, ο ΕΟΑ και η υφή του εδάφους μπορούν να επηρεάσουν το πορώδες (Thomsen, Schjonning, Jensen, Kristensen, & Christensen, 1999). Οι βιοπόροι είναι σημαντικοί για τον αερισμό του εδάφους και τη διάχυση νερού, κάτι που ενισχύει την αποσύνθεση. Οι μικροί πόροι προστατεύουν τον ΕΟΑ εμποδίζοντας τους μικροοργανισμούς να δραστηριοποιηθούν λόγω έλλειψης διαθέσιμου αέρα και ύδατος. Το όργωμα, η διασπορά της αργίλου, η συμπίεση και η ξήρανση οδηγούν σε μείωση του πορώδους. Μπορεί το όργωμα αρχικά να αυξάνει το πορώδες αλλά μακροπρόθεσμα μειώνει τη συσσωμάτωση και κάνει το έδαφος ευάλωτο στη συμπίεση.

Εδαφικό νερό

Η δομή και η υφή του εδάφους επηρεάζουν σημαντικά τη ροή του νερού, τη διαθεσιμότητά του και την αποθήκευση (Pachepsky & Rawls, 2003). Η συσσωμάτωση και οι διασυνδεδεμένοι πόροι,

δημιουργούν ένα δίκτυο όπου αυξάνεται η ροή του νερού στο έδαφος. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται η διήθηση του νερού, μειώνεται η απορροή και το νερό κινείται σε πιο βαθειά επίπεδα του εδάφους, αυξάνοντας την απορροή (Franzuebbers, 2002). Αντίθετα, η μειωμένη ροή του νερού σε αυτό το δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε άνυδρες συνθήκες (Bronick & Lal, 2005).

Βιοτικές επιδράσεις

Φυτά

Το είδος των φυτών που καλύπτουν μια περιοχή παίζει σημαντικό ρόλο στη δομή του εδάφους. Τα φυτικά υπολείμματα που επιστρέφουν στο έδαφος και τα χημικά που απελευθερώνονται από τα φυτά, επηρεάζουν το ρυθμό και τη σταθερότητα της συσσωμάτωσης καθώς και τον κύκλο εργασιών των συσσωματωμάτων. Ορισμένες καλλιέργειες παρέχουν υπολείμματα με υψηλή περιεκτικότητα σε φαινόλες και αυξάνουν τη συσσωμάτωση σε σχέση με άλλες καλλιέργειες. Παρόλα αυτά η συνεχής μονοκαλλιέργεια μειώνει τα μικρο-συσσωματώματα σε σχέση με την εναλλαγή καλλιεργειών και την ενδιάμεση αγροανάπαυση (Bronick & Lal, 2005).

Οι φυτικές ρίζες και το σύστημα της ριζόσφαιρας που σχηματίζουν, επιδρούν σημαντικά στην εδαφική συσσωμάτωση, η οποία τείνει να αυξάνεται όταν αυξάνεται η πυκνότητα του ριζικού βόθρου. Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων είναι μεγαλύτερη σε εδάφη με πλούσιο ριζικό σύστημα, το οποίο φιλοξενεί μεγάλο πλήθος μικροοργανισμών οι οποίοι συμβάλουν στον ΕΟΑ και τη συσσωμάτωση. Χημικά, οι ρίζες συμβάλουν στη συσσωμάτωση με το να απελευθερώνουν ποικιλία ενώσεων που δρουν συγκολλητικά μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων. Τα διαφορετικά ριζικά συστήματα επιδρούν διαφορετικά στη συσσωμάτωση, λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων, εκκρίματων και λειτουργιών που παρουσιάζουν (Bronick & Lal, 2005).

Μικροοργανισμοί

Οι ρίζες, οι μύκητες και τα βακτήρια ενισχύουν τη συσσωμάτωση με το να συμπλέκουν τα εδαφικά σωματίδια μέσω των εξωκυτταρικών τους ενώσεων, που δεσμεύουν τα σωματίδια μεταξύ τους.

Η μικροβιακή δραστηριότητα ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος των συσσωματωμάτων, την εποχή, τις καλλιεργητικές πρακτικές, τη διαχείριση, την ποσότητα και ποιότητα των υπολειμμάτων και τον τύπο του εδάφους (Schutter & Dick, 2002)(Mendes, Bandick, Dick, & Bottomley, 1999). Γενικά η βακτηριακή δραστηριότητα συμβάλει στη μικρο-συσσωμάτωση ενώ η μυκητιακή δραστηριότητα συμβάλει στη μακρο-συσσωμάτωση (Schutter & Dick, 2002)(Tisdall & Oades, 1982).

Εδαφική πανίδα

Μέσα στο έδαφος ζουν διάφορα έντομα, αρθρόποδα, γαιοσκώληκες, νηματοειδή και μικροοργανισμοί, οι οποίοι συμμετέχουν σημαντικά στη δομή του εδάφους. Απορροφούν και εκκρίνουν εδαφικό υλικό, μετατοπίζουν φυτικό υλικό και δημιουργούν κανάλια καθώς κινούνται (Amezketta, 1999). Γενικά βελτιώνουν τον αερισμό, το πορώδες, τη διήθηση, την ανάμιξη των υπολειμμάτων, τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων, τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών και την κινητικότητα των μετάλλων.

Οι γαιοσκώληκες συμβάλουν στην εδαφική συσσωμάτωση μέσω βιολογικών και φυσικοχημικών αλλαγών (J Six, Bossuyt, Degryze, & Denef, 2004). Η επίδρασή τους εξαρτάται από το είδος τους και την ποιότητα των υπολειμμάτων ενώ ταυτόχρονα ο πληθυσμός τους επηρεάζεται από την ποιότητα

και ποσότητα του φυτικού υλικού. Οι γαιοσκώληκες καταναλώνουν εδαφικό υλικό με αποτέλεσμα να σπάνε τους δεσμούς που σταθεροποιούν τα συσσωματώματα. Η αναδιάρθρωση των εδαφικών σωματιδίων μαζί με την απελευθέρωση ενζύμων από τους γαιοσκώληκες επηρεάζει την ανοργανοποίηση, τη ροή του νερού και τη μικροβιακή δραστηριότητα. Έτσι οι γαιοσκώληκες συμβάλουν στην αύξηση του ΕΟΑ στα καλούπια και τα υλικά των επιφανειών των καναλιών που σχηματίζουν στο έδαφος. Εν γένει η δράση τους αυξάνει τα υδατο-σταθερά μακρο-συσσωματώματα, τα οποία ουσιαστικά είναι τα καλούπια που σχηματίζουν.

Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της δομής του εδάφους

Η επίδραση των αυξημένων εκπομπών CO₂ στη δομή του εδάφους, δεν είναι πλήρως κατανοητές. Σε περιβάλλοντα με επαρκή θρεπτικά συστατικά η αύξηση του ατμοσφαιρικού CO₂ μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του ΕΟΑ και της συσσωμάτωσης, ενώ σε περιβάλλοντα περιορισμένα σε θρεπτικά, η ισορροπία μεταξύ διαθεσιμότητας θρεπτικών, φυτικών απαιτήσεων και κύκλου εργασιών του άνθρακα μπορεί να περιορίσει το φαινόμενο.

Ο τύπος του εδάφους, οι παράγοντες συσσωμάτωσης, οι πρακτικές διαχείρισης και περιβαλλοντικές συνθήκες αλληλεπιδρούν για να καθορίσουν τη συσσωμάτωση σε ένα έδαφος. Οι πρακτικές διαχείρισης που ελαχιστοποιούν τη διατάραξη, μεγιστοποιούν τον ΕΟΑ που επιστρέφει στο έδαφος, βελτιώνουν την παραγωγικότητα και αυξάνουν τη δεξαμενή ΕΟΑ. Κατάλληλη χρήση των τροποποιήσεων του εδάφους όπως η λίπανση και η χρήση εδαφοβελτιωτικών, οδηγεί σε αύξηση της δεξαμενής του ΕΟΑ και της συσσωμάτωσης. Το ίδιο συμβαίνει και με την εφαρμογή βιώσιμων αγροτικών πρακτικών όπως ο συνδυασμός ή η εναλλαγή καλλιεργειών. Οι πρακτικές διαχείρισης που μειώνουν τους ρυθμούς αποσύνθεσης και τις εκπομπές CO₂, επίσης βοηθούν στην αύξηση της αποθήκευσης ΕΟΑ.

Δομή του εδάφους και πρακτικές διαχείρισης

Η υποβάθμιση του εδάφους αποτελεί μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα παγκοσμίως με απειλές άμεσες για το οικοσύστημα και τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα για τις μελλοντικές καλλιέργειες. Οι πρακτικές διαχείρισης του εδάφους πρέπει να προσανατολίζονται στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τις αγροτικές διαδικασίες για τον έλεγχο της υποβάθμισης της δομής του (Pagliai, Vignozzi, & Pellegrini, 2004).

Η εγκατάλειψη της παραδοσιακής μεθόδου της εναλλαγής των καλλιεργειών και η υιοθέτηση της εντατικής μονοκαλλιέργειας, χωρίς την προσθήκη κοπριάς και φυτικής προέλευσης οργανικής ύλης, έχει οδηγήσει στη μείωση της περιεκτικότητας της οργανικής ύλης του εδάφους και κατ' επέκταση στη μείωση της σταθερότητας της εδαφικής δομής (R. Lal, Mahboubi, & Fausey, 1994). Κάτι τέτοιο μειώνει και τη δράση των χημικών λιπασμάτων. Η διάβρωση μπορεί να επηρεάσει τη μετακίνηση των εδαφικών σωματιδίων και θρεπτικών με αποτέλεσμα τη ρύπανση των επιφανειακών υδάτων (Pagliai et al., 2004).

Η δομή του εδάφους είναι μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες που επηρεάζουν την παραγωγή των καλλιεργειών, καθώς προσδιορίζει το βάθος που μπορούν τα διεισδύσουν οι ρίζες των φυτών, το μέγεθος του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί και την κίνηση του αέρα, του νερού και της εδαφικής πανίδας (Langmaack, 1999).

Η υποβάθμιση της δομής του εδάφους που προκαλείται από την εντατική καλλιέργεια, τη συμπίεση του εδάφους και τη δημιουργία επιφανειακής ξήρανσης (κρούστας), οδηγεί στην απώλεια της

συνέχειας των πόρων μετάδοσης. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η μεταφορά του νερού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απορροή και η διάβρωση.

Πρακτικές διαχείρισης που ενισχύουν τη δομή του εδάφους Διαχείριση του εδάφους

Η διαχείριση του εδάφους που θα αυξάνει τη συσσωμάτωση πρέπει να στοχεύει στην αύξηση της φυτικής παραγωγής, στην αύξηση της ποσότητας του άνθρακα που εισέρχεται στο έδαφος, στη μείωση της διατάραξης και στη μείωση του ρυθμού απώλειας του άνθρακα μέσω της αποσύνθεσης και της διάβρωσης. Σε αυτό το πλαίσιο συμπεριλαμβάνονται βελτιωμένες πρακτικές διαχείρισης που αφορούν μεθόδους οργώματος, διαχείρισης υπολειμμάτων, τροποποιήσεις, διαχείρισης εδαφικής γονιμότητας και κύκλους θρεπτικών.

Το όργωμα σπάει τα συσσωματώματα, συμπιέζει το έδαφος και διαταράσσει τις φυτικές και ζωικές κοινότητες που συμβάλουν στη συσσωμάτωση, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ΕΟY, τα θρεπτικά και η μικροβιακή δραστηριότητα που συμβάλει στη συσσωμάτωση (Bronick & Lal, 2005). Σε σύγκριση με το συνεχές συμβατικό όργωμα, εναλλακτικά συστήματα άροσης όπως το ελάχιστο όργωμα, το υπεδάφειο σπάσιμο κλπ, βελτιώνουν το σύστημα πόρων του εδάφους, αυξάνοντας τους πόρους αποθήκευσης (0.5 – 50 mm) και το ποσό των πόρων μετάδοσης (50 – 500 mm) (Pagliai et al., 2004). Με τον τρόπο αυτό επιτρέπεται μεγαλύτερη κίνηση του νερού, κάτι που φαίνεται από τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας σε εδάφη που εφαρμόζονται εναλλακτικά συστήματα άροσης.

Η επιστροφή του εδάφους με φυτικά υπολείμματα βελτιώνει τη δομή του καθώς μειώνει τη διάβρωση και την εξάτμιση, προστατεύει από την επίδραση της βροχής και αυξάνει τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων (Bronick & Lal, 2005). Ταυτόχρονα αυξάνεται η δεξαμενή του ΕΟΑ και τροποποιούνται οι συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Το μέγεθος της βελτίωσης της εδαφικής δομής από τα φυτικά υπολείμματα, εξαρτάται από το είδος και την ποσότητά τους.

Η προσθήκη εδαφοβελτιωτικών όπως κοπριά και compost ενισχύουν τη δομή του εδάφους καθώς αυξάνοντας τον ΕΟΑ αυξάνεται η μικροβιακή δραστηριότητα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το πορώδες και να μειώνεται η πυκνότητα (Bronick & Lal, 2005). Εκτός από το πορώδες αυξάνεται και η κατανομή του μεγέθους των πόρων μετά την εφαρμογή εδαφοβελτιωτικών όπως η ιλύς από επεξεργασμένα λύματα, η κομπόστα από αστικά απορρίμματα, τα απόβλητα κτηνοτροφίας και η παραδοσιακή κοπριά. Η κοπριά από την κτηνοτροφία φαίνεται να έχει καλύτερη επίδραση στο πορώδες του εδάφους, κάνοντας την επιφανειακή δομή πιο σταθερή (Pagliai et al., 2004). Τα λιπάσματα από την άλλη ενώ γενικά βελτιώνουν την εδαφική συσσωμάτωση, ενδέχεται κάτω από ορισμένες συνθήκες να μειώσουν τη συγκέντρωση του ΕΟΑ, να μειώσουν τη συσσωμάτωση και τις μικροβιακές κοινότητες σε σχέση με τα προηγούμενα εδαφοβελτιωτικά. Τα λιπάσματα αυξάνουν τη φυτική παραγωγή και βελτιώνουν τα φυτικά υπολείμματα που επιστρέφουν στο έδαφος. Το γεγονός όμως ότι επιδρούν στο pH του εδάφους μπορεί να έχει δυσμενής συνέπειες.

Διαχείριση καλλιεργειών

Η εφαρμογή καλλιεργειών στο έδαφος μειώνει τον ΕΟΑ αυξάνοντας το μεταβολικό CO₂. Οι πρακτικές διαχείρισης που εφαρμόζονται για να επιτευχθεί αύξηση του ΕΟΑ και της συσσωμάτωσης περιλαμβάνουν λίπανση, διαχείριση βοσκοτόπων, εναλλαγή καλλιέργειας σε

φυσική βλάστηση, συμπερίληψη καλυπτικών καλλιεργειών που μειώνουν τη διάβρωση, εμβολιασμός γαιοσκωλήκων, άρδευση.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΘΡΑΚΑ

Δέσμευση άνθρακα

Οι διεργασίες τις εδαφικής οργανικής ύλης (ΕΟΥ) μπορούν να συμβάλουν στην ενίσχυση της δέσμευσης οργανικού άνθρακα, με αλλαγές στις χρήσεις γης και εν γένει στη διαχείριση του εδάφους (Post & Kwon, 2000).

Υπάρχει ένα μεγάλος εύρος στο χρόνο που απαιτείται και στο ρυθμό με τον οποίο ο άνθρακας συσσωρεύεται στο έδαφος και σχετίζεται με την παραγωγή της βλάστησης που αναπτύσσεται έπειτα μια αλλαγή στη χρήση γης, τις φυσικές και βιολογικές συνθήκες του εδάφους και από τις προηγούμενες προσθήκες οργανικού άνθρακα με πιθανές φυσικές διαταράξεις (όργωμα).

Στα οικοσυστήματα είθισται η ποσότητα του άνθρακα στο έδαφος να είναι μεγαλύτερη από αυτή στη βλάστηση. Είναι σημαντικό λοιπόν να γνωρίζουμε τις δυναμικές του εδαφικού άνθρακα καθώς και το ρόλο που παίζουν στο ισοζύγιο των οικοσυστημάτων αλλά και στον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα. Είναι γνωστό το γεγονός ότι η αλλαγή της φυσικής βλάστησης με κάποια καλλιέργεια οδηγεί σε απώλεια του εδαφικού οργανικού άνθρακα (ΕΟΑ). Οι λόγοι που συμβάλουν σε αυτό είναι η μειωμένη εισαγωγή οργανικού υλικού, η αυξημένη ικανότητα αποσύνθεσης των φυτικών υπολειμμάτων και το όργωμα, το οποίο μειώνει τη φυσική προστασία στην αποσύνθεση.

Ο εδαφικός οργανικός άνθρακας περιλαμβάνει φυτικά, ζωικά και μικροβιακά υπολείμματα σε όλα τα στάδια τις αποσύνθεσής τους. Πολλές οργανικές ενώσεις στο έδαφος συνδέονται άρρηκτα με ανόργανα εδαφικά σωματίδια. Ο ρυθμός σχηματισμού των διάφορων εδαφικών οργανικών ενώσεων ποικίλει λόγω των περίπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ βιολογικών, χημικών και φυσικών διεργασιών του εδάφους. Παρόλο που μπορεί να υπάρχει μια συνέχεια στις οργανικές ενώσεις του άνθρακα, σε ότι αφορά τους χρόνους διάσπασης και σχηματισμού, η τεχνική της φυσικής κλασμάτωσης καθορίζουν τις διακριτές εδαφικές δεξαμενές άνθρακα. Τα φυσικά καθορισμένα κλάσματα, ενώ περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα οργανικών ενώσεων, ενσωματώνουν δομικές και λειτουργικές ιδιότητες στον εδαφικό οργανικό άνθρακα (Post & Kwon, 2000).

Όταν η φυσική βλάστηση εναλλάσσεται από καλλιέργειες, μειώνεται γρήγορα το εδαφικό οργανικό υλικό και αυτό εν μέρει οφείλεται σε ένα κατώτερο κλάσμα ,μη διαλυτού υλικού, που βρίσκεται στα υπολείμματα των καλλιεργειών που αποσυντίθεται πιο εύκολα. Παράλληλα το όργωμα, αναδεύει και αναμιγνύει το έδαφος, με αποτέλεσμα να σπάνε τα συσσωματώματα και να εκθέτουν τις οργανο-αργιλικές επιφάνειες που προστατεύονταν από τους αποικοδομητές. Παρατηρείται μια μείωση στον εδαφικό οργανικό άνθρακα κατά 50% στο ανώτερο στρώμα του εδάφους (20 cm) μετά από καλλιέργεια 30 έως 50 ετών (Post & Kwon, 2000).

Για τη μελέτη της μεταβολής του εδαφικού οργανικού άνθρακα σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, χρησιμοποιούνται γειτονικές εκτάσεις με το ίδιο έδαφος, σαν κοντρόλ. Παραμένουν δηλαδή για πολλά χρόνια ακαλλιεργήτες δίνοντας μια εικόνα για τον εδαφικό οργανικό άνθρακα αν δεν υπήρχε η καλλιέργεια.

Γενικά παρατηρείται αύξηση του εδαφικού οργανικού άνθρακα όταν η καλλιέργεια (ή και η ξυλώδη βλάστηση) αντικαθίσταται από μόνιμη χλόη.

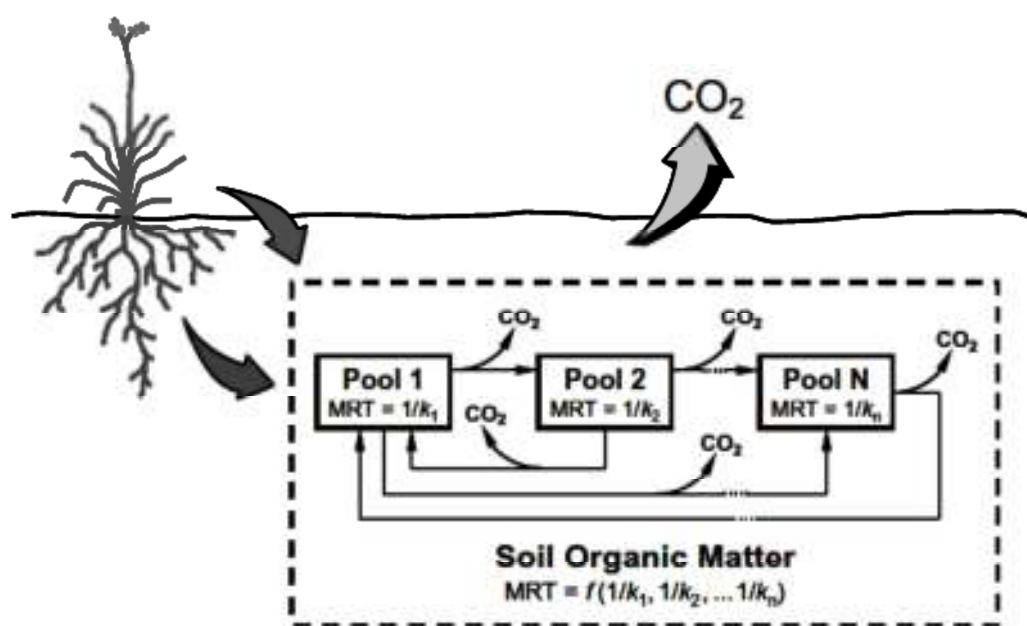
Οργανική ύλη και κύκλος εργασιών

Η εδαφική οργανική ύλη (ΕΟΥ) είναι ένα δυναμικό μέγεθος. Το απόθεμα του οργανικού υλικού στο έδαφος αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με το κλίμα, το είδος της βλάστησης, τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών, τη διατάραξη του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις πρακτικές διαχείρισης.

Με τον όρο turnover ενός στοιχείου σε μια δεξαμενή γενικά αναφερόμαστε στην ισορροπία εισροής και εκροής του στοιχείου στη δεξαμενή. Συνήθως εκφράζει το μέσο χρόνο παραμονής (MRT) του στοιχείου ή το χρόνο ημίσειας ζωής. Ο MRT ενός στοιχείου προσδιορίζεται είτε ως ο μέσος χρόνος που το στοιχείο παραμένει στη δεξαμενή σε σταθερή κατάσταση, είτε ως ο μέσος χρόνος που απαιτείται για να ανανεωθεί πλήρως το περιεχόμενο της δεξαμενής σε σταθερή κατάσταση (J Six & Jastrow, 2002).

Ο χρόνος ημίσειας ζωής της εδαφικής οργανικής ύλης αναφέρεται στο χρόνο που απαιτείται για την αποσύνθεση του υπάρχοντος αποθέματος.

Αν θεωρήσουμε k το ρυθμό αποσύνθεσης της εδαφικής οργανικής ύλης, τότε ο χρόνος ημίσειας ζωής υπολογίζεται από τη σχέση $MRT = \frac{1}{k}$ (J Six & Jastrow, 2002).



Εικόνα 3: Ο χρόνος ημίσειας ζωής της Ε.Ο.Υ. προσδιορίζεται από την ισορροπία μεταξύ εισροών και εκροών. Η ολική Ε.Ο.Υ. αποτελείται από διάφορες δεξαμενές που αποσυντίθενται με διαφορετικούς ρυθμούς. Ο μέσος χρόνος παραμονής (MRT) της Ε.Ο.Υ. είναι μια συνάρτηση των ρυθμών αποσύνθεσης των δεξαμενών που την απαρτίζουν. (J Six & Jastrow, 2002)

Δυναμική άνθρακα σε κλάσματα σωματιδιακής οργανικής ύλης

Η καλλιέργεια εδαφών που καλύπτονται με δάση ή λιβάδια, προκαλεί μεγάλες αλλαγές στη δυναμική της ΕΟΥ. Για να προβλεφθεί η επίδραση της καλλιέργειας, πρέπει να προσδιοριστεί ποιες δεξαμενές άνθρακα επηρεάζονται και ποιες όχι. Οι ρυθμοί μείωσης του εδαφικού οργανικού άνθρακα είναι μεγαλύτεροι στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις από ότι στα δάση, κατά μια τάξη μεγέθους. Μπορεί έτσι να θεωρηθεί απροσπάτευτη η ΕΟΥ στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις.

Η μελέτη των κινητικών αποδόμησης έδειξε ότι οι οργανικές δεξαμενές προστατεύονται από την υποβάθμιση κάτω από φυσική βλάστηση, ενώ εκτίθενται κάτω από καλλιέργεια (J Six, Conant, Paul, & Paustian, 2002).

Οι δεξαμενές αυτές θεωρούνται κλάσματα της ΕΟY, τα οποία διαχωρίζονται και ποσοτικοποιούνται, ώστε να προβλέπεται η επίδραση της μεταβολής των χρήσεων γης στα αποθέματα της ΕΟY.

Τα κλάσματα της σωματιδιακής οργανικής ύλης επηρεάζονται σημαντικά από την καλλιέργεια. Έπειτα από 35 χρόνια καλλιέργειας μιας δασικής περιοχής, το ποσοστό της σωματιδιακής οργανικής ύλης στο έδαφος μειώθηκε από 6,1 % σε 1,96%, με τη μείωση να παρατηρείται κυρίως στα μεγαλύτερα κλάσματα.

Υπάρχει ισχυρή σχέση ανάμεσα στο μέγεθος των σωματιδίων και το χρόνο ζωής της οργανικής ύλης.

Ο χρόνος παραμονής του εδαφικού άνθρακα σε δασική βλάστηση είναι περισσότερο από 8 φορές πιο αργός από ότι σε καλλιέργεια. Η ανόργανη λίπανση του εδάφους ενισχύει τη μικροβιακή δραστηριότητα και τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών. Οι αλλαγές στη θερμοκρασία του εδάφους επίσης επηρεάζουν τη μικροβιακή δραστηριότητα. Η φυσική προστασία της ΕΟY στα σταθερά συσσωματώματα μπορεί να μειωθεί με το όργωμα και την έκθεση του εδάφους σε βροχή και ξηρασία. Η απομάκρυνση των γαιοσκωλήκων κατά την καλλιέργεια οδηγεί επίσης στη μείωση της φυσικής προστασίας της ΕΟY.

Μηχανισμοί σταθεροποίησης της οργανικής ύλης

Η σχέση μεταξύ της δομής του εδάφους και της ικανότητάς του να σταθεροποιεί την ΕΟY είναι το βασικό στοιχείο στις δυναμικές του εδαφικού άνθρακα. Έχουν προταθεί τρεις κύριοι μηχανισμοί σταθεροποίησης της ΕΟY: 1) η χημική σταθεροποίηση, 2) η φυσική προστασία και 3) η βιοχημική σταθεροποίηση (J Six, Conant, et al., 2002). Η χημική σταθεροποίηση της ΕΟY είναι το αποτέλεσμα των χημικών ή φυσικοχημικών δεσμών μεταξύ της ΕΟY και των εδαφικών ανόργανων συστατικών (σωματιδίων αργίλου και ιλύος). Η φυσική προστασία από τα συσσωματώματα υποδεικνύεται από τη θετική επίδραση της συσσωμάτωσης στη συσσώρευση της ΕΟY (J Six, Conant, et al., 2002). Τα συσσωματώματα προστατεύουν την ΕΟY σχηματίζοντας φυσικά σύνορα μεταξύ μικροβίων και ενζύμων και των υποστρωμάτων τους. Η βιοχημική σταθεροποίηση νοείται σαν τη σταθεροποίηση της ΕΟY μέσω της ίδιας της χημικής της σύστασης και μέσω χημικών μεθόδων συμπλοκοποίησης στα εδάφη.

ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΑ

Οργανική ύλη και υδατο-σταθερά συσσωματώματα

Η καλή δομή του εδάφους, που ευνοεί την ανάπτυξη καλλιεργειών, εξαρτάται από την παρουσία των συσσωματωμάτων εδαφικών σωματιδίων, διαμέτρου 1 έως 10 χιλιοστών, τα οποία παραμένουν σταθερά όταν διαβρέχονται. Τα υδατο-σταθερά συσσωματώματα πρέπει να είναι πορώδη ώστε να παραμένουν αερόβια και ταυτόχρονα να έχουν έναν επαρκή αριθμό μικρότερων πόρων ώστε να κατακρατούν το νερό που χρειάζονται τα φυτά για την ανάπτυξή τους. Οι πόροι που σχηματίζονται μεταξύ των συσσωματωμάτων πρέπει να είναι σχετικά μεγάλοι, ώστε να επιτρέπουν την ταχεία διήθηση του νερού (Tisdall & Oades, 1982).

Όταν ένα ασταθές συσσωμάτωμα, το οποίο έχει ξηραθεί με αέρα, ξαφνικά βραχεί, θραύει σε μικρότερες μονάδες οι οποίες με τη σειρά τους μπορούν να είναι συσσωματώματα (Tisdall & Oades, 1982). Η θραύση των συσσωματωμάτων συμβαίνει όταν αυτά δεν είναι ισχυρά ώστε να αντέξουν τις πιέσεις από τον παγιδευμένο αέρα στο έδαφος. Σε ένα αγροτεμάχιο, η θραύση των συσσωματωμάτων παρατηρείται στο ανώτερο στρώμα του εδάφους, μιας και στα κατώτερα στρώματα υπάρχει προστασία από την ξήρανση λόγω του αέρα και από την απότομη διάβρωση. Στις αρδευόμενες περιοχές, το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά σοβαρό επειδή τα στρώματα που έχουν υποστεί αυτή τη διαδικασία, περιορίζουν τη διείσδυση του νερού και την ανάπτυξη των φυτών.

Τα μικρότερα συσσωματώματα που παράγονται, μπορούν επίσης να είναι ασταθή, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση ακόμα μικρότερων αργιλικών σωματιδίων. Όταν συσσωρεύεται μεγάλος όγκος αργίλου μειώνεται η ισχύς των ελκτικών δυνάμεων των σωματιδίων (Tisdall & Oades, 1982). Η διασπορά των αργιλικών σωματιδίων δύναται να φράξει τους πόρους του εδάφους οι οποίοι διοχετεύουν ή αποθηκεύουν νερό, ενώ η θραύση των συσσωματωμάτων και η διασπορά των μικρών σωματιδίων δημιουργούν ανεπιθύμητες δομές όπως η επιφανειακή κρούστα.

Υπάρχει σχέση μεταξύ του οργανικού άνθρακα στο έδαφος και των υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων. Η συσχέτιση όμως περιορίζεται από διάφορες παραμέτρους, όπως ότι μόνο ένα μέρος του οργανικού υλικού ευθύνεται για τη συσσωμάτωση, υπάρχει ένα ανώτατο όριο οργανικού άνθρακα πάνω από το οποίο δεν παρατηρείται περεταίρω αύξηση των συσσωματωμάτων, τα οργανικά υλικά δεν είναι οι κύριοι συνδετικοί παράγοντες ενώ έχει περισσότερη σημασία η διάθεση και όχι η ποσότητα και το είδος του οργανικού υλικού. Η σταθερότητα σχετίζεται καλύτερα με τα ελεύθερα οργανικά υλικά, παρά με τον ολικό οργανικό άνθρακα, διότι λειτουργεί σαν υπόστρωμα για την μικροβιακή παραγωγή οργανικού συνδετικού υλικού (Tisdall & Oades, 1982).

Η διαχείριση του εδάφους μπορεί να αλλάξει την περιεκτικότητα οργανικού υλικού κάτω από διάφορες κλιματικές συνθήκες.

Η καλλιέργεια ευνοεί τη μείωση της περιεκτικότητας του οργανικού υλικού. Αυτό ενισχύεται στην περίπτωση που εναλλάσσεται με αγρανάπαυση κατά την οποία απομακρύνονται όλα τα φυτικά υπολείμματα. Όταν το έδαφος καλλιεργείται εντατικά, τα συσσωματώματα εκτίθενται συχνά στη φυσική διάβρωση από ραγδαία φαινόμενα άρδευσης και βροχόπτωσης. Το προστατευόμενο οργανικό υλικό εκτίθεται στους μικροοργανισμούς ενθαρρύνοντας την οξείδωση και απώλεια της οργανικής ύλης. Αυτή η μείωση συχνά συνοδεύεται με τη μείωση των υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων (Tisdall & Oades, 1982).

Αντίθετα, η οργανική ύλη μπορεί να συσσωρευτεί σε λιβάδια όπου η προσθήκη φυτικής βιομάζας είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι στις καλλιέργειες. Η ανάπτυξη των φυτών και η εισροή φυτικών υπολειμμάτων στο έδαφος, καθυστερούν την αποσύνθεση της οργανικής ύλης. Ο αριθμός των υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων σε λιβάδια και βοσκοτόπους αυξάνεται. Επειδή η αύξηση της συσσωμάτωσης σχετίζεται με το μήκος του ριζικού συστήματος και η εισροή των φυτικών υπολειμμάτων γίνεται στα ανώτερα επίπεδα του εδάφους, εκεί παρατηρείται η περισσότερη συσσωμάτωση.

Δομή και διαχείριση του εδάφους

Η συσσωμάτωση προκαλείται από τον εδαφικό οργανικό άνθρακα, τους ζωντανούς οργανισμούς, την ιοντική γεφύρωση, την άργιλο και τα ανθρακικά άλατα. Ο εδαφικός οργανικός άνθρακας

λειτουργεί σαν δεσμευτικός παράγοντας και σαν πυρήνας στο σχηματισμό των συσσωματωμάτων. Οι ζωντανοί οργανισμοί και τα οργανικά παράγωγά τους συμβάλουν στο σχηματισμό της δομής του εδάφους, τα οποία στη συνέχεια ασκούν σημαντικό έλεγχο στις δυναμικές του εδαφικού οργανικού άνθρακα. Ο χρόνος παραμονής του ΕΟΑ και ο ρυθμός αποσύνθεσής του, είναι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητά του στην αύξηση της συσσωμάτωσης. Κρυσταλλικά και άμορφα μεταλλικά οξείδια και υδροξείδια είναι σημαντικά στοιχεία συσσωμάτωσης. Τα μεταλλικά ιόντα σχηματίζουν γέφυρες μεταξύ ορυκτών και οργανο-ορυκτών σωματιδίων. Η άργιλος δρα επίσης σαν στοιχείο συσσωμάτωσης, ενώνοντας τα σωματίδια μεταξύ τους και επηρεάζοντας την αποσύνθεση και το χρόνο παραμονής του ΕΟΑ (Bronick & Lal, 2005).

Βασική αντίληψη της συσσωμάτωσης

Τα συσσωματώματα είναι δευτερογενή σωματίδια που σχηματίζονται μέσω του συνδυασμού των ορυκτών σωματιδίων με οργανικές και ανόργανες ουσίες. Το σύμπλεγμα των δυναμικών της συσσωμάτωσης είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης πολλών παραγόντων συμπεριλαμβανομένων του περιβάλλοντος, των παραγόντων διαχείρισης του εδάφους, την επίδραση των φυτών καθώς και των ιδιοτήτων του εδάφους όπως η σύνθεση των ορυκτών, η υφή, η συγκέντρωση του ΕΟΑ, η μικροβιακή δραστηριότητα, το απόθεμα των θρεπτικών και η διαθέσιμη υγρασία (Bronick & Lal, 2005). Τα συσσωματώματα συναντώνται με διάφορους τρόπους και σε διάφορα μεγέθη. Συνήθως ομαδοποιούνται ανάλογα με το μέγεθός τους σε μακρο-συσσωματώματα (>250 μm) και μικρο-συσσωματώματα (<250 μm) τα οποία στη συνέχεια ομαδοποιούνται περεταίρω ανάλογα και πάλι με το μέγεθός τους (Tisdall & Oades, 1982). Οι διαφορετικές ομάδες διαφέρουν στις ιδιότητές τους όπως οι συνδετικοί παράγοντες και η κατανομή άνθρακα και αζώτου.

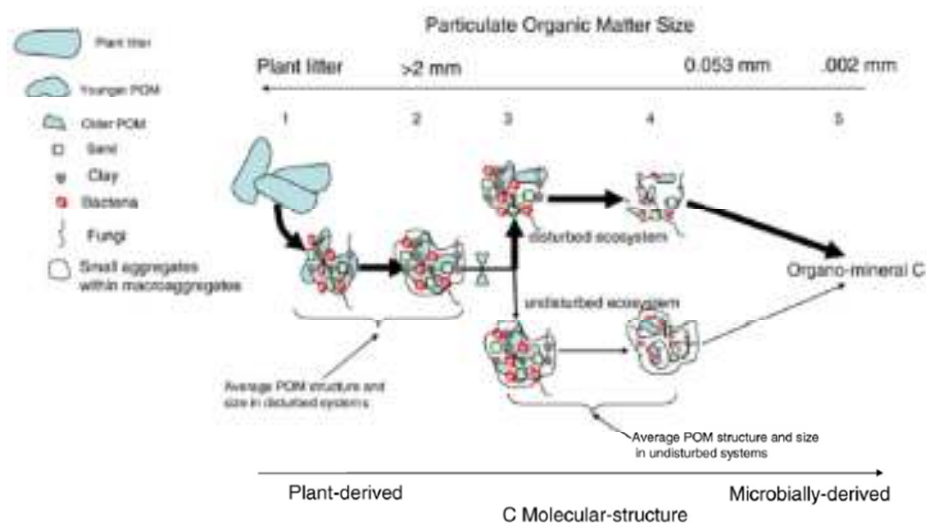
Μηχανισμοί της συσσωμάτωσης

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί συσσωμάτωσης. Τα συσσωματώματα σχηματίζονται σε στάδια, με διαφορετικούς μηχανισμούς συγκόλλησης να κυριαρχούν σε κάθε στάδιο (Tisdall & Oades, 1982). Η ιεραρχική θεωρία της συσσωμάτωσης προτείνει ότι τα μικρο-συσσωματώματα ενώνονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν τα μακρο-συσσωματώματα και ότι οι δεσμοί μέσα στα μικρο-συσσωματώματα είναι πιο ισχυροί από τους δεσμούς μεταξύ των μικρο-συσσωματωμάτων (Edwards & Bremner, 1967). Τα μικρο-συσσωματώματα σχηματίζονται από οργανικά μόρια που συνδέονται με άργιλο και πολυσθενή κατιόντα για να σχηματίσουν σωματιδιακές ενώσεις, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν τα μακρο-συσσωματώματα (Bronick & Lal, 2005).

Εναλλακτικά, τα μακρο-συσσωματώματα μπορούν να σχηματιστούν γύρω από τη σωματιδιακή οργανική ύλη. Καθώς η ΣΟΥ αποσυντίθεται και απελευθερώνονται μικροβιακές εκκρίσεις, τα μακρο-συσσωματώματα γίνονται πιο σταθερά, ο λόγος C/N μειώνεται και μικρο-συσσωματώματα σχηματίζονται εσωτερικά. Ο εσωτερικός σχηματισμός των μικρο-συσσωματωμάτων περιέχει μια πιο ανθεκτική δεξαμενή ΕΟΑ (Plante, Alain F., McGill, 2002). Καθώς η πιο ασταθής δεξαμενή ΕΟΑ χρησιμοποιείται και η μικροβιακή δραστηριότητα μειώνεται, ο εφοδιασμός από εκκρίματα μειώνεται και τα μακρο-συσσωματώματα χάνουν τη σταθερότητά τους, με αποτέλεσμα να διαταράσσονται και να απελευθερώνουν πιο σταθερά μικρο-συσσωματώματα (Jastrow, Miller, & Lussenhop, 1998)(J. Six, Elliott, & Paustian, 1999).

Οι ρίζες και οι υφές περιπλέκονται και απελευθερώνουν οργανικές ενώσεις, οι οποίες δρουν σαν κόλλα συγκρατώντας τα σωματίδια μεταξύ τους. Τα σωματίδια δύναται να αναδιαταχθούν κατά τη διάρκεια της περιπλοκής, ενώ ο κύκλος υγρού – ξηρού βοηθά στη σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων. Τα βακτηριακά συσσωματώματα σχηματίζονται καθώς οι βακτηριακές αποικίες και τα εκκρίματά τους σχηματίζουν μια κάψουλα πολυσακχαρίτη γύρω από την οποία τα αργιλικά σωματίδια ευθυγραμμίζονται και έλκονται με ξήρανση και συρρίκνωση. Αυτό το αργιλικό κέλυφος σχηματίζει ένα προστατευτικό κάλυμμα για τη βακτηριακή αποικία, αναστέλλοντας την αποσύνθεση του ΕΟΑ εσωτερικά. Η ομόκεντρη θεωρία της συσσωμάτωσης υποστηρίζει ότι εξωτερικά στρώματα σχηματίζονται ομοκεντρικά γύρω από την εξωτερική επιφάνεια του συσσωματώματος, με αποτέλεσμα νεώτερος άνθρακας να βρίσκεται στα εξωτερικά στρώματα των συσσωματωμάτων απ' ότι στα εσωτερικά (Bronick & Lal, 2005).

Η κατακρήμνιση οξειδίων, φωσφορικών και ανθρακικών αλάτων, ενισχύει τη συσσωμάτωση. Τα κατιόντα διεγείρουν την καθίζηση των ενώσεων που δρουν σαν συνδετικοί παράγοντες των πρωτογενών σωματιδίων. Τα κατιόντα σχηματίζουν επίσης γέφυρες μεταξύ αργίλου και σωματιδίων ΕΟΥ οδηγώντας σε συσσωμάτωση. Οι διαλυμένες οργανικές ενώσεις με τα κατιόντα μπορούν να δημιουργήσουν οργανο-μεταλλικά σύμπλοκα, τα οποία μετακινούνται και καθιζάνουν σε άλλα σημεία στο έδαφος. Η συμπλοκοποίηση αυτή μειώνει τη μικροβιακή πρόσβαση στον ΕΟΑ και την ανοργανοποίηση.



Εικόνα 4: Κύκλος των μακρο-συσσωματωμάτων: διεργασία σχηματισμού και καταστροφής τους (Grandy & Neff, 2008)

Δυναμικές συσσωματωμάτων και χρόνος παραμονής

Τα συσσωματώματα μπορούν να διασπαστούν με διάφορους μηχανισμούς, ανάλογα με τη φύση των συνδετικών παραγόντων. Οι δραστηριότητες των εδαφικών οργανισμών επηρεάζουν το χρόνο κατακράτησης και τον κύκλο εργασιών του άνθρακα στο έδαφος, το οποίο με τη σειρά του επηρεάζει τη σταθεροποίηση του άνθρακα, τη συσσωμάτωση και το χρόνο παραμονής (turnover). Η αποσύνθεση επηρεάζεται από τη δραστηριότητα των εδαφικών οργανισμών, τις ιδιότητες του εδάφους και περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η διαθεσιμότητα θρεπτικών και η υγρασία (Christensen, 2001). Ο λόγος C/N συνήθως χρησιμοποιείται ως δείκτης του χρόνου παραμονής (turnover) του ΕΟΑ.

Η αποσύνθεση της ΕΟΥ επηρεάζεται από τη δομή του εδάφους μέσω του πορώδους, της ανταλλαγής αερίων και της υγρασίας, καθώς επίσης και από τη φυσική θέση του άνθρακα όπως το βάθος. Οι δυναμικές του κύκλου εργασιών (turnover) ποικίλουν χωρικά μέσα στο έδαφος και μέσα στα συσσωματώματα καθώς και στο βάθος του χρόνου. Οι δυναμικές του ΕΟΑ μπορεί να είναι πιο αργές κατά το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, με αποτέλεσμα πιο αργούς χρόνους παραμονής (turnover) για τα μακρο-συσσωματώματα (Plante, Alain F., McGill, 2002). Τα συσσωματώματα επίσης διασπώνται από φυσικές διαταραχές όπως το όργωμα και η βροχόπτωση.

Κλίμα

Το κλίμα επηρεάζει την εδαφική συσσωμάτωση μέσω των μεταβολών της θερμοκρασίας και της υγρασίας, τις εναλλαγές καθεστώτων υγρασίας – ξήρανσης και τους κύκλους ψύξης – απόψυξης, τα οποία μπορούν να αναπροσανατολίσουν τα σωματίδια οδηγώντας πιθανών σε βελτιωμένη συσσωμάτωση και αυξημένη απομόνωση ΕΟΑ μέσα στα συσσωματώματα. Οι μεταβολές σε θερμοκρασία και υγρασία επηρεάζουν τη μικροβιακή και βιοτική δραστηριότητα με αποτέλεσμα τη μεταβολή των ρυθμών αποσύνθεσης. Η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και αποσύνθεσης ποικίλει σημαντικά εξαιτίας της επίδρασης πολλών άλλων παραγόντων. Μεγαλύτερες θερμοκρασίες οδηγούν σε υψηλότερα επίπεδα αναπνοής και βιολογικής δραστηριότητας στο έδαφος, ενώ χαμηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε μεγαλύτερα αποθέματα ΕΟΑ (Franzluebbers et al., 2001). Τα ψυχρά και υγρά εδάφη τείνουν να έχουν περισσότερο αδιάθετο ΕΟΑ από τα θερμά και ξηρά (Franzluebbers et al., 2001).

Οι άγονες συνθήκες έχουν διάφορες επιδράσεις στη συσσωμάτωση. Παράγοντες όπως τα ανθρακικά, οι γαιοσκώληκες και η ξήρανση μπορούν να αυξήσουν τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων σε άγονα περιβάλλοντα (Boix-Fayos et al., 2001). Ενώ η ξήρανση μειώνει τη διείσδυση του νερού, ταυτόχρονα μειώνει την αποκόλληση και τη διάβρωση, κάτι που έχει θετικό αντίκτυπο στα συσσωματώματα (Amezketta, 1999). Ορισμένα εδάφη σε ξηρές περιοχές παρουσιάζουν υψηλότερα επίπεδα συσσωμάτωσης και σταθερών μικρο-συσσωματωμάτων, σε σχέση με υγρές περιοχές όπως η Μεσόγειος (Boix-Fayos et al., 2001). Η μείωση της υγρασίας του εδάφους και η επακόλουθη μείωση της βλάστησης μπορούν να οδηγήσουν σε μειωμένη δομική ανάπτυξη και συσσωμάτωση καθώς και σε αύξηση της διάβρωσης. Η μειωμένη σταθερότητα των συσσωματωμάτων μπορεί να οφείλεται στην αυξημένη διάβρωση και απορροή. Κάτι τέτοιο οδηγεί στη μείωση του ΕΟΑ, της περιεκτικότητας αργίλου και της ικανότητας ανταλλαγής κατιόντων (Boix-Fayos et al., 1998).

Τα καθεστώτα υγρασίας και θερμοκρασίας μπορούν να τροποποιηθούν από τις πρακτικές διαχείρισης, όπως η άρδευση και η καλλιεργητική κάλυψη. Το συμβατικό όργωμα αυξάνει την έκθεση στον αέρα, τον ήλιο και τον άνεμο. Οι πρακτικές διαχείρισης μπορούν να μετριάσουν την επίδραση υγρού – ξηρού κύκλου, παράδειγμα τα εδάφη που δεν οργώνονται δέχονται λιγότερη επίδραση αυτού του κύκλου λόγω της προστασίας των επιφανειακών υπολειμμάτων (Denef, Six, Paustian, & Merckx, 2001). Η διασπορά που προκαλείται από αυτό τον κύκλο μπορεί να μειωθεί τροποποιώντας τα εδάφη με χουμικές ουσίες (Piccolo, Pietramellara, & Mbagwu, 1997).

Παράγοντες συσσωμάτωσης

Άνθρακας

Η πηγή του άνθρακα, είτε είναι εδαφικός οργανικός άνθρακας είτε εδαφικός ανόργανος άνθρακας, επηρεάζει τη σύνθεση και τη συγκέντρωσή του στο έδαφος. Με τη σειρά του αυτό επηρεάζει την αποτελεσματικότητά του στη συσσωμάτωση μέσω των ενώσεών του με κατιόντα και σωματίδια. Η σύνθεση του ΕΟΑ αντανακλά το ρυθμό αποσύνθεσής του και απελευθέρωσης κατιόντων στο εδαφικό διάλυμα καθώς επίσης και την ικανότητά του να δημιουργεί σύμπλοκα με τα κατιόντα του εδαφικού διαλύματος.

Εδαφικός ανόργανος άνθρακας

Ο εδαφικός ανόργανος άνθρακας βρίσκεται στο έδαφος με τη μορφή πρωτογενών ή δευτερογενών ορυκτών. Τα πρωτογενή ανθρακικά άλατα προέρχονται από το μητρικό πέτρωμα και αποτελούν την πρώτη ύλη για το σχηματισμό δευτερογενών ανθρακικών αλάτων, όταν διαλύονται και μετατοπίζονται από το νερό με οργανικά οξέα και CO₂ του από το έδαφος ή την ατμόσφαιρα. Κάτω από συνθήκες μειωμένης υγρασίας ή υψηλού pH, τα κατιόντα, τα όξινα ανθρακικά, τα διαλυμένα ανθρακικά και το CO₂ αλληλεπιδρούν με διαθέσιμα κατιόντα για να σχηματίσουν δευτερογενή ανθρακικά, τα οποία σχηματίζουν επικαλύψεις σε πρωτογενή σωματίδια.

Εδαφικός οργανικός άνθρακας

Ο ΕΟΑ δημιουργεί περιοχές ετερογένειας στο έδαφος οδηγώντας σε κρίσιμα σημεία συσσωμάτωσης. Γενικά ο αυξημένος ΕΟΑ σχετίζεται με αυξημένη συσσωμάτωση. Οι χημικές ιδιότητες του ΕΟΑ καθορίζουν την ικανότητα συμπλοκοποίησης του και επηρεάζουν του ρυθμούς αποσύνθεσής του, πράγμα το οποίο έχει άμεσο αντίκτυπο στη συσσωμάτωση (Schulten & Leinweber, 2000). Ο βαθμός της συσσωμάτωσης του ασταθούς ΕΟΑ είναι μεν γρήγορος αλλά παροδικός, ενώ ο ΕΟΑ που αποσυντίθεται με πιο αργό ρυθμό έχει μικρότερη επίδραση στη συσσωμάτωση αλλά έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η απομόνωση του εύκολα αποδομήσιμου κλάσματος του άνθρακα μέσα στα συσσωματώματα, αυξάνει τη σταθερότητα μειώνοντας την αποσύνθεσή τους. Επίσης, αύξηση της μικροβιακής βιομάζας οδηγεί σε αύξηση της σταθερότητας της συσσωμάτωσης (Haynes & Beare, 1997).

- Σωματιδιακή οργανική ύλη

Η σωματιδιακή οργανική ύλη αποτελείται από μεγάλα σωματίδια οργανικής ύλης τα οποία απαντώνται είτε ως ελεύθερα σωματίδια λεπτού κλάσματος (light fraction) είτε επιστρωμένα σε σωματίδια του εδάφους, το οποίο προσφέρει προστασία από την αποσύνθεση. Το λεπτό κλάσμα στο έδαφος σχετίζεται με την άργιλο και τα πολυσθενή κατιόντα για τη δημιουργία συσσωματωμάτων (Jastrow, 1996). Σε εδάφη που δεν οργώνονται, η αύξηση του ΕΟΑ και της συσσωμάτωσης οφείλεται στο λεπτό κλάσμα της ΣΟΥ (J. Six et al., 1999). Η ΣΟΥ μπορεί να δράσει ως πυρήνας για το σχηματισμό μακρο-συσσωματωμάτων, καθώς το υλικό συσσωρεύεται γύρω από τη ΣΟΥ. Τα μακρο-συσσωματώματα έχουν μεγάλη συγκέντρωση σε ΣΟΥ χαμηλής πυκνότητας (Jastrow, 1996). Η ΣΟΥ αποτελεί σημαντικό παράγοντα σύνδεσης των μικρο-συσσωματωμάτων για τη δημιουργία μακρο-συσσωματωμάτων. Καθώς οι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν τη ΣΟΥ, απελευθερώνουν πολυσακχαρίτες που δρουν σαν συνδετικοί παράγοντες (Jastrow, 1996).

- Υδατάνθρακες

Ο ρόλος των υδατανθράκων στη βελτίωση της δομής του εδάφους ποικίλει, ανάλογα με την πηγή και τη φύση τους αλλά και τις ιδιότητες των συσσωματωμάτων και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι υδατάνθρακες που προέρχονται από τα φυτά είναι συχνά χονδροειδούς μεγέθους και εμφανίζονται στο κλάμα της άμμου, ενώ οι υδατάνθρακες που παράγονται από μικροβιακές διεργασίες είναι λεπτότεροι και εμφανίζονται στα κλάσματα ιλύος και αργίλου (Schulten & Leinweber, 2000). Οι υδατάνθρακες μικροβιακής προέλευσης τείνουν να είναι ανθεκτικοί στην αποσύνθεση. Το μειωμένο όργωμα, η προσθήκη κοπριάς και η φυτοκάλυψη, σχετίζονται με την αύξηση των συγκεντρώσεων υδατανθράκων και βελτιώνουν τη δομή του εδάφους.

- Πολυσακχαρίτες

Οι πολυσακχαρίτες ανοργανοποιούνται εύκολα και λειτουργούν ως συνδετικοί παράγοντες για τη συσσωμάτωση, χωρίς όμως να έχουν μακροπρόθεσμη σταθερότητα (Tisdall & Oades, 1982). Απορροφώνται ισχυρά στις επιφάνειες των ορυκτών, λειτουργώντας ως γέφυρες ένωσης των εδαφικών σωματιδίων. Μπορούν επίσης να σχηματίσουν μια ουσία που δρα ως κόλλα για τη δέσμευση των σωματιδίων σε συσσωματώματα.

- Φαινόλες

Οι φαινόλες είναι πρόδρομοι των χουμικών ενώσεων και αυξάνουν τη συσσωμάτωση. Αυξημένη συσσωμάτωση συχνά σχετίζεται με την παρουσία φυτών που περιέχουν υψηλά επίπεδα φαινολών (Martens, 2000).

- Λιγνίνη

Ο αργός ρυθμός αποσύνθεσης της λιγνίνης θεωρείται σημαντικός παράγοντας για το χρόνο παραμονής/κύκλο εργασιών (turnover) του άνθρακα, ενισχύοντας τη συσσωμάτωση (Magill & Aber, 1998).

- Λιπίδια

Τα λιπίδια στα εδάφη συχνά εμπλουτίζουν τα κλάσμα της αργίλου (Schulten & Leinweber, 2000). Σε ορισμένα εδάφη τα λιπίδια ενισχύουν τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων εξαιτίας της υδρόφοβης φύσης τους (Bronick & Lal, 2005).

- Χουμικές ουσίες

Η συμπεριφορά των χουμικών ενώσεων είναι αποτέλεσμα της χημικής αντοχής τους και της συσχέτισής τους με το πλέγμα του εδάφους, κάτι το οποίο προσφέρει φυσική προστασία. Τα χουμικά οξέα απορροφούνται από τις επιφάνειες των αργιλικών σωματιδίων μέσω των πολυσθενών κατιόντων, προσφέροντάς τους ανθεκτικότητα στην αντιμετώπιση της διασποράς της αργίλου. Οι χουμικές ενώσεις αυξάνουν τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων και μειώνουν τη διασπορά σε κύκλους υγρασίας – ξηρασίας.

Άργιλος και αργιλική ορυκτολογία

Τα αργιλικά ορυκτά επηρεάζουν τις ιδιότητες της συσσωμάτωσης όπως η επιφάνεια, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, το φορτίο, δυνατότητα διασποράς και επέκτασης, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν το ρυθμό αποσύνθεσης του ΕΟΑ. Η αλληλεπίδραση της αργίλου, του ΕΟΑ και των συσσωματωμάτων επηρεάζεται από το εδαφικό pH, την ΙΑΚ, τα ιόντα, όλα εκ των οποίων σχετίζονται με την ποσότητα και τον τύπο της αργίλου που βρίσκεται στο έδαφος (Amezketta, 1999).

Η άργιλος απαντάται είτε σε κρυσταλλική μορφή με δομή επιπέδων, είτε σε μη κρυσταλλική μορφή με άμορφη δομή. Σε ορισμένα εδάφη η μη κρυσταλλική άργιλος είναι σημαντικός παράγοντας συσσωμάτωσης. Οι κρυσταλλικές άργιλοι που δεν επεκτείνονται, έχουν χαμηλή ΙΑΚ και επιφάνεια με αποτέλεσμα να μειώνεται η σταθερότητα των συσσωματωμάτων. Αντίθετα οι κρυσταλλικές άργιλοι με υψηλή δραστικότητα παρουσιάζουν υψηλή ΙΑΚ, μεγάλες επιφάνειες και υψηλό ΕΟΑ (Amezketta, 1999; Schulten & Leinweber, 2000; Seta & Karathanasis, 1996; J Six, Elliott, et al., 2000).

Κατίοντα

- Κατίοντα ασβεστίου και μαγνησίου
- Κατίοντα σιδήρου και αργιλίου
- Κατίοντα φωσφόρου
- Κατίοντα νατρίου

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Το ενδιαφέρον για τη μακρόχρονη βιωσιμότητα των αγροτικών οικοσυστημάτων έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Σημαντικό ρόλο στην κατανόηση των δυναμικών των ιδιοτήτων του εδάφους (δυναμικές ΕΟΥ, κύκλος θρεπτικών) παίζει η μελέτη του εδαφικού υποστρώματος, του εδαφικού βιόκοσμου και των αλληλεπιδράσεών τους. Επειδή οι αλληλεπιδράσεις αυτές προσδίδουν μεγάλη πολυπλοκότητα, θεωρείται αξιόπιστη η αντιμετώπισή της με τη μελέτη της συσσωμάτωσης. Τα συσσωματώματα προστατεύουν φυσικά την ΕΟΥ, επηρεάζουν τη δομή της μικροβιακής κοινότητας, περιορίζουν τη διάχυση του οξυγόνου, ρυθμίζουν τη ροή του νερού, καθορίζουν την προσρόφηση και εκρόφηση θρεπτικών και μειώνουν την απορροή και τη διάβρωση (J Six et al., 2004).

Έχουν αναπτυχθεί πολλές θεωρίες για τη σχέση μεταξύ των συσσωματωμάτων και της ΕΟΥ. Από τις αρχές του περασμένου αιώνα έχουν προσδιοριστεί οι σημαντικότεροι παράγοντες που καθορίζουν το σχηματισμό και τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων όπως η εδαφική πανίδα, οι μικροοργανισμοί του εδάφους, οι ρίζες, οι παράγοντες ανόργανων δεσμών και οι περιβαλλοντικές μεταβλητές (Nikolaidis & Bidoglio, 2013; J Six et al., 2004). Παρόλα αυτά πριν το 1950 δεν παρατηρείται ιδιαίτερη προσπάθεια για την ανάπτυξη θεωρητικών πλαισίων του σχηματισμού των συσσωματωμάτων και της σχέσης του με τους παραπάνω παράγοντες.

Το πρώτο εννοιολογικό μοντέλο συσσωμάτωσης-ΕΟΥ, που βασιζόταν στην υπάρχουσα γνώση, προτάθηκε από τον Emerson(1959). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο η ΕΟΥ αυξάνει τη σταθερότητα του εδάφους με τη σύνδεση πεδίων προσανατολισμένης αργίλου και σωματιδίων χαλαζία (J Six et al., 2004).

Οι (Edwards & Bremner, 1967) παρουσίασαν τη θεωρία κατά την οποία ο σχηματισμός των μικρο-συσσωματωμάτων είναι μια αντίδραση στερεάς φάσης μεταξύ της οργανικής ύλης, πολυσθενών μετάλλων και ηλεκτρικά ουδέτερης αργίλου (J Six et al., 2004). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό τα πλέον σταθερά συσσωματώματα είναι τα μικρο-συσσωματώματα λεπτής άμμου και μεγέθους ιλύος (<53 μm), που αποτελούνται από σύμπλοκα αργίλου, πολυσθενών μετάλλων και οργανικής ύλης. Επίσης θεωρείται ότι η οργανική ύλη που συμπλέκεται μέσα στα μικρο-συσσωματώματα είναι απρόσιτη στους μικροοργανισμούς με αποτέλεσμα να προστατεύεται φυσικά.

Το ιεραρχικό μοντέλο που προτάθηκε από τους (Tisdall & Oades, 1982) αποτελεί τη σημαντικότερη θεωρητική επίτευξη στην κατανόηση της αλληλεπίδρασης ΕΟΥ – συσσωμάτωσης (J Six et al., 2004). Σύμφωνα με (Tisdall & Oades, 1982) τα υδατο-σταθερά συσσωματώματα διαχωρίζονται σε μικρο και μακρο ανάλογα με το αν έχουν διάμετρο μικρότερη ή μεγαλύτερη των 250 μm αντίστοιχα. Τα μικρο-συσσωματώματα σταθεροποιούνται και αντιστέκονται στη διάσπαση που μπορεί να προκληθεί από απότομη διάβρεξη και από μηχανική διατάραξη όπως η καλλιέργεια, με διάφορους μηχανισμούς. Στα μακρο-συσσωματώματα, σημαντικό ρόλο στη σταθερότητά τους παίζει η ανάπτυξη του ριζικού συστήματος. Ο αριθμός τους δύναται να μειωθεί αν οι ρίζες που αποσυντίθενται δε αντικαθίστανται. Η σταθερότητά τους λοιπόν ελέγχεται άμεσα από τις αγροτικές πρακτικές δείχνοντας αύξηση σε εδάφη με λιβάδια και μείωση σε καλλιεργούμενες εκτάσεις.

Το μοντέλο παρουσιάζει τέσσερα στάδια συσσωμάτωσης:

$<0.2 \mu\text{m} \rightarrow 0.02 - 2 \mu\text{m} \rightarrow 2 - 20 \mu\text{m} \rightarrow 20 - 250 \mu\text{m} \rightarrow >2000 \mu\text{m}$

Τα συσσωματώματα με διάμετρο $>2000 \mu\text{m}$ αποτελούνται από συσσωματώματα και σωματίδια που συνδέονται κυρίως από ένα λεπτό δίκτυο ριζών και υφών. Επειδή η σταθερότητά τους εξαρτάται από την ανάπτυξη των ριζών, κατ' επέκταση σχετίζεται και με τις αγροτικές πρακτικές.

Τα μικρο-συσσωματώματα (20-250 μm) είναι σταθερά σε ταχεία διάβρεξη και δεν καταστρέφονται από τις γεωργικές πρακτικές. Ακόμα και σε εδάφη που καλλιεργούνται χρόνια, καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό συσσωματωμάτων. Τα μικρο-συσσωματώματα αποτελούνται κυρίως από σωματίδια (2-20 μm) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με οργανικά υλικά. Η σταθερότητά τους έγκειται εν μέρει στο μικρό τους μέγεθος και στους διάφορους τύπους συνδετικών παραγόντων. Οι οργανικοί δεσμοί μεταξύ των σωματιδίων πρέπει να είναι ισχυροί, επειδή ο οργανικός άνθρακας στα μικρο-συσσωματώματα είναι ο μισός σε σχέση με αυτό των πιο ασταθών μακρο-συσσωματωμάτων ($>250\mu\text{m}$).

Τα συσσωματώματα μεγέθους 2-20 μm αποτελούνται από αργιλικά σωματίδια $<2\mu\text{m}$ που συνδέονται με ισχυρούς οργανικούς δεσμούς και δεν διαταράσσονται από καλλιεργητικές πρακτικές. Ένα μεγάλο μέρος της μικροβιακής βιομάζας βρίσκεται στο κλάσμα αργίλου-ιλύος (Tisdall & Oades, 1982). Επειδή όμως μόνο το 2% του οργανικού υλικού στα εδάφη αποτελείται από βιομάζα (Tisdall & Oades, 1982), τα συσσωματώματα αργίλου-ιλύος που αποτελούνται από έμβια βακτήρια, είναι πρόσφατα σχηματισμένα. Όταν η αποικία των βακτηρίων αρχίζει να αποσυντίθεται, παραμένουν τα ινώδη συνθετικά των βακτηριακών καψιδίων (Tisdall & Oades, 1982), τα οποία αποτελούν συνδετικό οργανικό υλικό των αργιλικών σωματιδίων, με αποτέλεσμα συσσωματώματα μεγαλύτερης ηλικίας. Τα μικρότερα από αυτά τα συσσωματώματα είναι μεγάλης ηλικίας και προστατεύουν το οργανικό υλικό που βρίσκεται μέσα σε αυτά, το οποίο αποτελείται κυρίως από χουμικά οξέα (Tisdall & Oades, 1982). Τα συσσωματώματα βακτηριακής προέλευσης,

αντιπροσωπεύουν ένα μικρό ποσοστό των σωματιδίων που σταθεροποιούνται από μικροβιακά υπολείμματα, μιας και οι μύκητες συνεισφέρουν περισσότερο από τα βακτήρια στο εδαφικό οργανικό υλικό (Tisdall & Oades, 1982). Ορισμένες υφές μυκήτων παράγουν ένα στρώμα άμορφου υλικού, στο οποίο – πιθανόν πολυσακχαρίτης – τα αργιλικά σωματίδια προσκολλώνται σταθερά (Tisdall & Oades, 1982). Ο κατακερματισμός των υφών οδηγεί στη σταθεροποίηση μικρών συσσωματωμάτων από τα υπολείμματα των μυκήτων. Όπως και με τις βακτηριακές αποικίες, η αποσύνθεση του κλάσματος των υφών οδηγεί σε ένα πλέγμα φυσικής προστασίας του οργανικού υλικού μέσα στα υδατο-σταθερά συσσωματώματα.

Τα υδατο-σταθερά σωματίδια διαμέτρου <2 μm σχηματίζονται από μεμονωμένες αργιλικές πλάκες οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με δυνάμεις van der Waals, δεσμούς υδρογόνου και έλξεις Coulomb. Επιπλέον η παρουσία οργανικών και ανόργανων υλικών, επηρεάζει τα φορτία στις επιφάνειες των αργιλικών πλακών, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ή να μειώνεται η έλξη μεταξύ των σωματιδίων.

Στο ιεραρχικό μοντέλο των (Tisdall & Oades, 1982) πραγματοποιήθηκε μια σημαντική τροποποίηση κατά τον (J. M. Oades, 1984) στην ιδέα της ιεραρχικής δομής των συσσωματωμάτων (J Six et al., 2004). Η τροποποίηση έγκειται στο ότι ενώ στο αρχικό μοντέλο (Tisdall & Oades, 1982) θεωρείται ότι τα συσσωματώματα σχηματίζονται με μια σειρά, πρώτα τα μικρο-συσσωματώματα τα οποία στη συνέχεια αποτελούν δομικά στοιχεία των μακρο-συσσωματωμάτων, στην επόμενη έκδοση (J. M. Oades, 1984) θεωρείται ότι οι ρίζες και οι υφές που συγκρατούν τα μακρο-συσσωματώματα, σχηματίζουν τον πυρήνα για το σχηματισμό των μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα. Από τη στιγμή που οι ρίζες και οι υφές αποτελούν προσωρινούς συνδετικούς παράγοντες, αποσυντίθεται σε κλάσματα επικαλυμμένα με βλεννώδη εκκρίματα της αποσύνθεσης, τα οποία περιβάλλονται από αργίλους, δημιουργώντας την έννοια των μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα (J Six et al., 2004).

Το ιεραρχικό μοντέλο δοκιμάστηκε από τον (Elliott, E.T., 1986) για να εξηγήσει τη μείωση της ΕΟY κατά την καλλιέργεια. Καθώς θεωρεί ότι τα μικρο-συσσωματώματα συνδέονται με την ΕΟY μέσα στα μακρο-συσσωματώματα, υποθέτει ότι τα μακρο-συσσωματώματα περιέχουν περισσότερη ασταθή ΕΟY σε σχέση με τα μικρο-συσσωματώματα και μάλιστα είναι αυτή η οποία χάνεται μετά από εφαρμογή καλλιέργειας (J Six et al., 2004). Αυτή θεωρείται η πρώτη άμεση συσχέτιση μεταξύ αγροτικής διατάραξης και απώλειας ασταθούς ΕΟY.

Οι (Elliott & Coleman, 1988) υιοθέτησαν την αντίληψη του σχηματισμού των μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα συσσωματώματα (J. M. Oades, 1984) και την απέδωσαν στις αναερόβιες συνθήκες εντός των μακρο-συσσωματωμάτων. Επίσης περιέγραψαν τέσσερις κατηγορίες πόρων αντίστοιχα με την ιεραρχία της συσσωμάτωσης: 1) μακροπόροι, 2) πόροι μεταξύ μακρο-συσσωματωμάτων, 3) πόροι μεταξύ μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα και 4) πόροι μεταξύ μικρο-συσσωματωμάτων (J Six et al., 2004). Αυτή η ιεραρχική δομή του δικτύου των πόρων καθορίζει τη σχέση μεταξύ οργανισμών και τροφικού πλέγματος.

Οι Shipitalo και Protz (1989) παρουσίασαν ένα μοντέλο για το σχηματισμό μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στις κάστες των γαιοσκωλήκων. Αυτό το μοντέλο έρχεται σε αντίθεση με τα υπόλοιπα μοντέλα σχηματισμού συσσωματωμάτων, γιατί περιγράφει πως οι γαιοσκώληκες προωθούν των σχηματισμό μικρο-συσσωματωμάτων που έχουν σαν πυρήνα την οργανική ύλη (J Six et al., 2004).

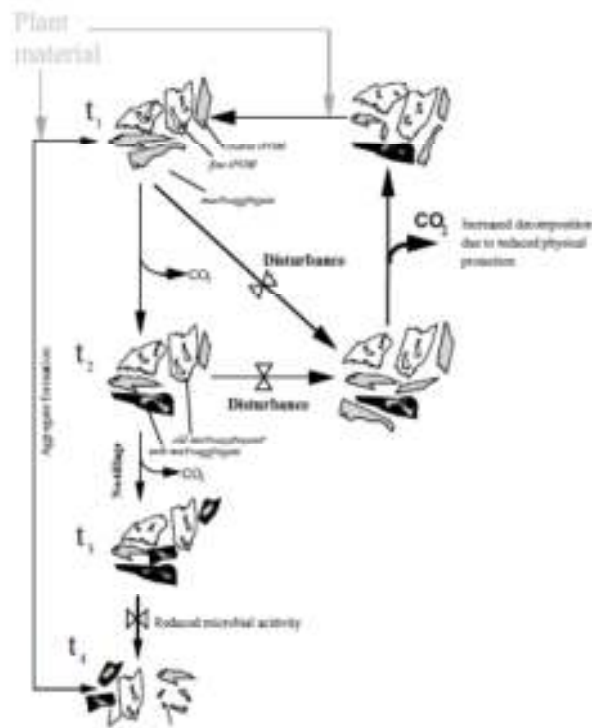
Οι (J. Oades & Waters, 1991) υποστήριξαν ότι αν το έδαφος εκφράζει μια ιεραρχία συσσωμάτωσης, τα μακρο-συσσωματώματα σταδιακά θα σπάσουν σε μικρο-συσσωματώματα πριν διαχωριστούν σε πρωτογενή σωματίδια, όταν εφαρμοστεί αυξανόμενη ενέργεια στο έδαφος, όπως 1) αργή διάβρωση, 2) γρήγορη διάβρωση, 3) ανατάραξη και 4) κατεργασία με υπέρηχους (J Six et al., 2004).

Σε μια σειρά μελετών, οι (Golchin A. Skjemstad J.O., 1994), συγκέντρωσαν επιβεβαιωτικά αποτελέσματα για ένα εννοιολογικό μοντέλο των αλληλεπιδράσεων μεταξύ της οργανικής ύλης, του βιόκοσμου του εδάφους, και των πρωτογενών σωματιδίων, που οδηγεί στο σχηματισμό, τη σταθεροποίηση και την υποβάθμιση των μικρο-συσσωματωμάτων (J Six et al., 2004). Οι (Golchin A. Skjemstad J.O., 1994) πρότειναν ότι όταν φρέσκο φυτικό υλικό (όπως τα επιφανειακά κατάλοιπα και οι ρίζες) εισέρχεται στο έδαφος, οδηγεί στο σχηματισμό συσσωματωμάτων επειδή διεγείρει την παραγωγή των συνδετικών παραγόντων μικροβιακής προέλευσης. Κατά τη διάρκεια της αποσύνθεσης, θραύσματα φυτικού υλικού ή σωματιδιακή οργανική ύλη (ΣΟΥ) σταδιακά επιστρώνονται με σωματίδια αργίλου και μικροβιακά προϊόντα, για να σχηματίσουν τον πυρήνα σταθερών μικρο-συσσωματωμάτων (J Six et al., 2004).

Οι (Angers, Recous, & Aita, 1997) παρουσίασαν σημαντικά στοιχεία που ενισχύουν την θεωρία του σχηματισμού μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα. Έπειτα από μετρήσεις άνθρακα στα συσσωματώματα, παρατήρησαν ότι στην αρχή της αποσύνθεσης είχε συσσωρευτεί άνθρακας στα μακρο-συσσωματώματα αλλά στη συνέχεια ο εμπλουτισμός των μακρο-συσσωματωμάτων με άνθρακα μειώθηκε. Ταυτόχρονα παρατηρήθηκε σταθεροποίηση του άνθρακα στα μικρο-συσσωματώματα. Αυτή η ανακατανομή του άνθρακα από τα μακρο-συσσωματώματα στα μικρο-συσσωματώματα με το χρόνο, δείχνει ξεκάθαρα ότι τα μικρο-συσσωματώματα σχηματίζονται μέσα στα μακρο-συσσωματώματα και στη συνέχεια απελευθερώνονται έπειτα από το σπάσιμο των μακρο-συσσωματωμάτων (J Six et al., 2004).

Έπειτα από αυτή τη μελέτη, έχουν αναπτυχθεί εννοιολογικά μοντέλα που παρουσιάζουν το ρόλο της ΕΟΥ και ιδιαίτερα της ΣΟΥ στο σχηματισμό των μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα. Γίνεται σαφές ότι η ΣΟΥ που προέρχεται από τις ρίζες παίζει σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό μικρο-συσσωματωμάτων, ο οποίος είναι καθοριστικός για την αποθήκευση και σταθεροποίηση του εδαφικού άνθρακα σε βάθος χρόνου (J Six et al., 2004).

Οι (J. Six, Elliott, Paustian, & Doran, 1998) δημιούργησαν ένα εννοιολογικό μοντέλο για να εξηγήσουν την επίδραση της διατάραξης του εδάφους στους ρυθμούς σταθεροποίησης του εδαφικού άνθρακα. Το μοντέλο αυτό συνδέει την ποσότητα του άνθρακα που χάνεται κατά τη διατάραξη με τον αυξημένο χρόνο κύκλου εργασιών των μακρο-συσσωματωμάτων, ο οποίος αναστέλλει το σχηματισμό των μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα και τη μακρόχρονη δέσμευση του άνθρακα στα μικρο-συσσωματώματα.



Εικόνα 5: Το εννοιολογικό μοντέλο του 'κύκλου ζωής' των μακρο-συσσωματωμάτων παρουσιάζει το σχηματισμό των νέων μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα και τη συσσώρευση σε σχέση με την ανοργανοποίηση του οργανικού άνθρακα των συσσωματωμάτων. Καθώς ο κύκλος εργασιών της συσσωμάτωσης λαμβάνει χώρα, ένα συσσωμάτωμα σχηματίζεται και σταθεροποιείται γύρω από ΣΟΥ επιστρωμένη με μικροβιακά παράγωγα και στη συνέχεια γίνεται ασταθές λόγω της διακοπής της μικροβιακής δραστηριότητας και τελικά διασπάται. Διατάραξη όπως το όργωμα ενισχύει τον κύκλο εργασιών των μακρο-συσσωματωμάτων και περιορίζει το σχηματισμό νέων μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα και την προστασία της ΕΟΥ σε αυτά τα μικρο-συσσωματώματα (J Six, Paustian, Elliott, & Combrink, 2000).

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται το μοντέλο των (J Six, Paustian, et al., 2000). Τη χρονική στιγμή 1 (t_1) τα μακρο-συσσωματώματα σχηματίζονται γύρω από το φρέσκο υπόλειμμα, το οποίο εν συνεχεία καθίσταται ως χονδροειδές ΣΟΥ εντός των συσσωματωμάτων. Το φρέσκο υπόλειμμα ενισχύει το σχηματισμό των μακρο-συσσωματωμάτων καθώς αποτελεί πηγή άνθρακα για τη μικροβιακή δραστηριότητα. Στη χρονική στιγμή 2 ($t_1 \rightarrow t_2$) η χονδροειδής ΣΟΥ διασπάται σε λεπτή ΣΟΥ. Σαν αποτέλεσμα η συγκέντρωση της λεπτής ΣΟΥ αυξάνεται με την ηλικία των μακρο-συσσωματωμάτων. Ένας μεγάλος αριθμός μεγάλης ηλικίας μακρο-συσσωματωμάτων υποδηλώνει αργούς κύκλους εργασιών και ο λόγος της λεπτής ΣΟΥ προς τη χονδροειδή ΣΟΥ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν έκφραση του κύκλου εργασιών των μακρο-συσσωματωμάτων. Τη χρονική στιγμή 3 ($t_2 \rightarrow t_3$) η λεπτή ΣΟΥ επιστρώνεται με σωματίδια αργίλου και μικροβιακά παράγωγα και σχηματίζει τα μικρο-συσσωματώματα μέσα στα μακρο-συσσωματώματα (J. Six et al., 1999, 1998). Τέλος, στη χρονική στιγμή 4 (t_4), οι δεσμοί των μακρο-συσσωματωμάτων υποβαθμίζονται, με αποτέλεσμα να χάνουν τη σταθερότητά τους και να απελευθερώνουν σταθερά μικρο-συσσωματώματα, τα οποία με τη σειρά τους θα αποτελέσουν οικοδομικά στοιχεία για τον επόμενο κύκλο σχηματισμού των μακρο-συσσωματωμάτων (Tisdall & Oades, 1982).

Μηχανισμοί σταθεροποίησης της οργανικής ύλης

Πολλά μοντέλα των δυναμικών της ΕΟΥ υποθέτουν κινητική πρώτης τάξης για την αποσύνθεση των διάφορων δεξαμενών της οργανικής ύλης (McGill, 1996), πράγμα που σημαίνει ότι τα αποθέματα ισορροπίας του άνθρακα είναι γραμμικά ανάλογα με τις εισροές άνθρακα στο έδαφος (Paustian,

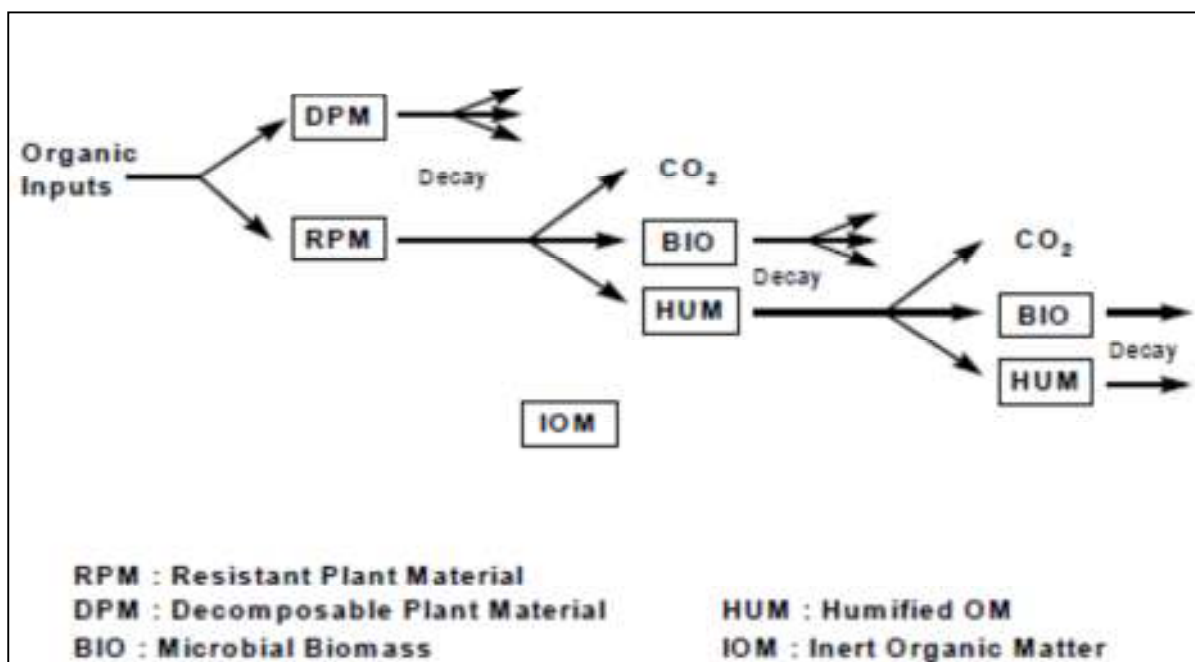
Collins, & Paul, 1997). Τα μοντέλα αυτά προβλέπουν ότι τα αποθέματα του άνθρακα στο έδαφος, θεωρητικά, αυξάνονται απεριόριστα σε περίπτωση που η εισροή του άνθρακα στο έδαφος είναι απεριόριστη. Με λίγα λόγια δεν υπάρχουν παραδοχές για κορεσμό του άνθρακα στο έδαφος. Ενώ αυτά τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση των δυναμικών της ΕΟΥ για τρέχουσες συνθήκες και πρακτικές διαχείρισης, είναι αμφίβολα τα αποτελέσματα που θα προκύψουν για εδάφη χαμηλής περιεκτικότητας άνθρακα σε μακροπρόθεσμα σενάρια όπου θα αυξάνεται η εισροή του άνθρακα (J Six, Feller, et al., 2002).

Ένας σημαντικός αριθμός μοντέλων της ΕΟΥ έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 40 χρόνια. Τα περισσότερα από αυτά εκφράζουν την ετερογένεια της ΕΟΥ με το να προσδιορίζουν διάφορες δεξαμενές, συνήθως τρεις έως πέντε, οι οποίες διαφέρουν ως προς τους ρυθμούς διάσπασης και τους παράγοντες που επηρεάζουν τους ρυθμούς αποσύνθεσης. Έχουν επίσης αναπτυχθεί εναλλακτικές συνθέσεις, όπου ένας συγκεκριμένος ρυθμός αποσύνθεσης μεταβάλλεται σαν συνάρτηση ενός συνεχούς ποιοτικού φάσματος της ΕΟΥ (δεν υπάρχουν διακριτές δεξαμενές). Σε κάθε περίπτωση όμως η αναπαράσταση των δεξαμενών του μοντέλου (ή του συνεχούς ποιοτικού φάσματος) είναι εννοιολογικά πρωταρχικής σημασίας στη φύση (J Six, Feller, et al., 2002).

Σύμφωνα με (J. Six, Conant, Paul, & Paustian, 2002), υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας του εδάφους σε άργιλο και ιλύ και της ποσότητας του άνθρακα που προστατεύεται από αυτή, δείχνοντας ένα επίπεδο κορεσμού του άνθρακα που προστατεύεται με την άργιλο και την ιλύ. Η σχέση αυτή διαφέρει ανάλογα με τις χρήσεις γης και μάλιστα η ΕΟΥ που σχετίζεται με το κλάσμα ιλύος-αργίλου μειώνεται με την καλλιέργεια.

Οι (J Six, Feller, et al., 2002) προτείνουν ότι η συμπεριφορά της ΕΟΥ μπορεί να ερμηνευτεί από τις βασικές φυσικοχημικές διαδικασίες του εδάφους και ότι η δομή ενός μοντέλου που σχετίζεται με αυτές τις διαδικασίες, είναι ικανή να περιγράψει τη συμπεριφορά των μετρούμενων δεξαμενών της ΕΟΥ. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει παραδοσιακά δυναμικές αποσύνθεσης πρώτης τάξης για την ΕΟΥ. Ένα σημαντικό πεδίο αυτού του μοντέλου είναι η έννοια ότι η αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους μπορεί να φτάσει σε σημείο κορεσμού, σε σχέση με τον άνθρακα. Ορίζονται τέσσερις δεξαμενές άνθρακα: 1)η δεξαμενή βιοχημικά προστατευόμενου άνθρακα, 2)η δεξαμενή αργίλου-ιλύος προστατευόμενου άνθρακα, 3)η δεξαμενή προστατευόμενου άνθρακα στα μικρο-συσσωματώματα και 4)η δεξαμενή απροστάτευτου άνθρακα. Κάθε δεξαμενή έχει τις δικές της δυναμικές και μηχανισμούς σταθεροποίησης, οι οποίοι καθορίζουν το επίπεδο στο οποίο ο εδαφικός άνθρακας γίνεται κορεσμένος.

Το μοντέλο RothC-26.3 (Coleman, K., Jenkinson, 1999) προσομοιώνει τον κύκλο εργασιών του οργανικού άνθρακα που εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη φυτοκάλυψη. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση με το μοντέλο RothC είναι η βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή, η θερμοκρασία του αέρα, η περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο, η εκτίμηση του πόσο εύκολα είναι διασπώμενο το εισερχόμενο φυτικό υλικό (λόγος DPM/RPM), η εισροή φυτικών υπολειμμάτων και το βάθος του εδάφους. Ο οργανικός άνθρακας του εδάφους χωρίζεται σε τέσσερις δεξαμενές και μία μικρή ποσότητα αδρανούς οργανικής ύλης (IOM). Οι τέσσερις δεξαμενές είναι το Διασπώμενο Φυτικό Υλικό (DPM), το Ανθεκτικό Φυτικό Υλικό (RPM), η Μικροβιακή Βιομάζα (BIO) και η Χουμική Οργανική Ουσία (HUM). Κάθε διαμέρισμα αποσυντίθεται με μια διαδικασία πρώτης τάξης με το δικό του χαρακτηριστικό ρυθμό. Η δεξαμενή του IOM είναι ανθεκτική στην αποσύνθεση. Η δομή του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Δομή του μοντέλου RothC (Coleman, K., Jenkinson, 1999)

Ο εισερχόμενος φυτικός άνθρακας μοιράζεται μεταξύ DPM και RPM, ανάλογα με το λόγο DPM / RPM του συγκεκριμένου εισερχόμενου φυτικού υλικού. Για τις περισσότερες γεωργικές καλλιέργειες βοσκότοπους, χρησιμοποιείται μια αναλογία DPM / RPM ίση με 1,44, δηλαδή 59% του φυτικού υλικού είναι DPM και 41% είναι RPM. Για λιβάδια και θάμνοι χρησιμοποιείται μια αναλογία 0,67. Για φυλλοβόλα ή τροπικά δάση η αναλογία DPM / RPM θεωρείται ίση με 0,25, έτσι ώστε το 20% είναι DPM και το 80% είναι RPM. Όλο το εισερχόμενο φυτικό υλικό περνά μέσα από αυτά τα δύο διαμερίσματα μία φορά, αλλά μόνο μία φορά. Τόσο DPM και RPM αποσυντίθενται για να σχηματίσουν CO₂, BIO και HUM. Το ποσοστό που πηγαίνει προς το CO₂ και BIO + HUM καθορίζεται από την περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο. Το BIO + HUM κατόπιν διαιρείται σε 46% BIO και 54% HUM. Το BIO και HUM εν συνεχεία αποσυντίθενται για να σχηματίσουν περεταίρω CO₂, BIO και HUM (Coleman, K., Jenkinson, 1999).

Το μοντέλο Struc-C που παρουσίασαν οι (Malamoud, McBratney, Minasny, & Field, 2009) είναι μια τροποποιημένη έκδοση του μοντέλου RothC-26.3 (Coleman, K., Jenkinson, 1999). Το μοντέλο αυτό προσδιορίζει τρία κλάσματα συσσωματωμάτων με αντίστοιχα τρεις τύπους άνθρακα των συσσωματωμάτων και συμπλοκοποιημένη άργιλο που κατανέμεται σε αυτά τα κλάσματα, υποθέτοντας συνεχή διαχωρισμό του EOA για κάθε κλάσμα (Nikolaidis & Bidoglio, 2013). Όταν υπολογιστούν τα οργανο-ορυκτά συσσωματώματα, το υπομοντέλο του πορώδους, υπολογίζει τη φαινόμενη πυκνότητα για κάθε τύπο συσσωματώματος και στη συνέχεια το νέο πορώδες του εδάφους. Παρά τα βασικά μειονεκτήματα του μοντέλου, όπως ότι θεωρεί κάθε τύπο συσσωματώματος σαν ξεχωριστή δεξαμενή άνθρακα χωρίς να υπολογίζει το ΣΟΥ στη διαδικασία της συσσωμάτωσης ή ότι ο σχηματισμός των μακρο-συσσωματωμάτων οφείλεται στα μικρο-συσσωματώματα και όχι στο συνδυασμό των μικρο-συσσωματωμάτων, των συσσωματωμάτων μεγέθους αργίλου-ιλύος (<53μm) και του ΣΟΥ (Johan Six, Feller, et al., 2002), εντούτοις θεωρείται η πιο ολοκληρωμένη προσπάθεια μοντελοποίησης της σταθερότητας και του κύκλου εργασιών των εδαφικών συσσωματωμάτων καθώς και της δομής του εδάφους μέχρι εκείνη τη στιγμή (Stamati, Nikolaidis, Banwart, & Blum, 2013).

Σε αντίθεση με τα υπάρχοντα μοντέλα της ΕΟY, το μοντέλο AggModel που παρουσιάστηκε από τους (Segoli et al., 2013), ενώ περιγράφει τη μεταφορά της ΕΟY μεταξύ των διαφορετικών δεξαμενών άνθρακα και την επακόλουθη σταδιακή αποσύνθεσή της μέσα σε αυτές, οι δεξαμενές που χρησιμοποιεί δεν είναι εννοιολογικές αλλά απευθείας μετρούμενες μέσω τεχνικών φυσικής κλασματοποίησης. Αποτελεί το πρώτο βήμα για τη δημιουργία ενός μοντέλου ΕΟY που θα χρησιμοποιεί μετρήσιμα κλάσματα της ΕΟY που σχετίζονται με τα συσσωματώματα, κάτω από συνθήκες πεδίου, που θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν σε υπάρχοντα μοντέλα οικοσυστήματος. Επίσης, η σχέση μεταξύ του κύκλου εργασιών (σηματισμός/διάσπαση) των μακρο-συσσωματωμάτων και σχηματισμού των μικρο-συσσωματωμάτων, καθώς και η δέσμευση άνθρακα που παρατηρείται σε πειράματα πεδίου, μπορούν να προσομοιωθούν επιτυχώς από το AggModel (Segoli et al., 2013).

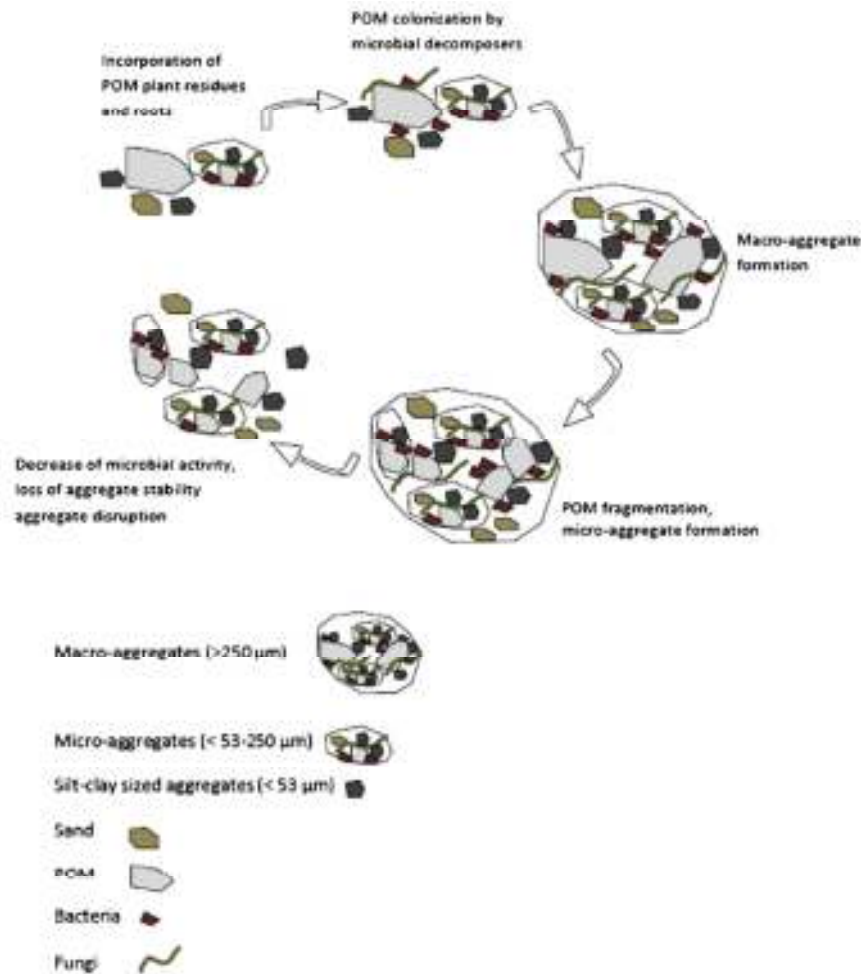
Το μοντέλο CAST (A coupled carbon, aggregation and structure turnover) που παρουσιάστηκε από (Stamati et al., 2013) βασίστηκε στην αντίληψη ότι τα μακρο-συσσωματώματα σχηματίζονται γύρω από την ΣΟY με επακόλουθη απελευθέρωση μικρο-συσσωματωμάτων. Οι δεξαμενές άνθρακα βασίστηκαν σε αυτές του μοντέλου RothC. Η αξιολόγηση του μοντέλου έγινε με χρήση δεδομένων πεδίου από εκτάσεις εναλλαγής χρήσεων γης, από καλλιέργεια σε αγρανάπαυση, σε δύο περιοχές, Ελλάδα (λεπτής υφής Μεσογειακή περιοχή) και Αϊόβα (αδρής υφής Ηπειρωτική περιοχή). Το μοντέλο CAST χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και θα περιγραφεί αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα.

MONTELO CAST (COUPLED CARBON, AGGREGATION AND STRUCTURE TURNOVER)

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο CAST για την προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Κουλιάρη. Πρόκειται για ένα μοντέλο πολλαπλών δεξαμενών οργανικού άνθρακα, που βασίζεται στην ιδέα ότι τα μακρο-συσσωματώματα σχηματίζονται γύρω από την ΣΟY, με επακόλουθη απελευθέρωση μικρο-συσσωματωμάτων. Το μοντέλο αυτό ενισχύει την κατανόηση των παραγόντων που καθορίζουν την οργανική ύλη, τη συσσωμάτωση και τον κύκλο εργασιών της δομής του εδάφους σε διάφορα οικοσυστήματα. Παράλληλα αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση των επιδράσεων των πρακτικών διαχείρισης, των εναλλαγών στις χρήσεις γης και της κλιματικής αλλαγής στο εδαφικό οικοσύστημα, με σκοπό το σχεδιασμό βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης.

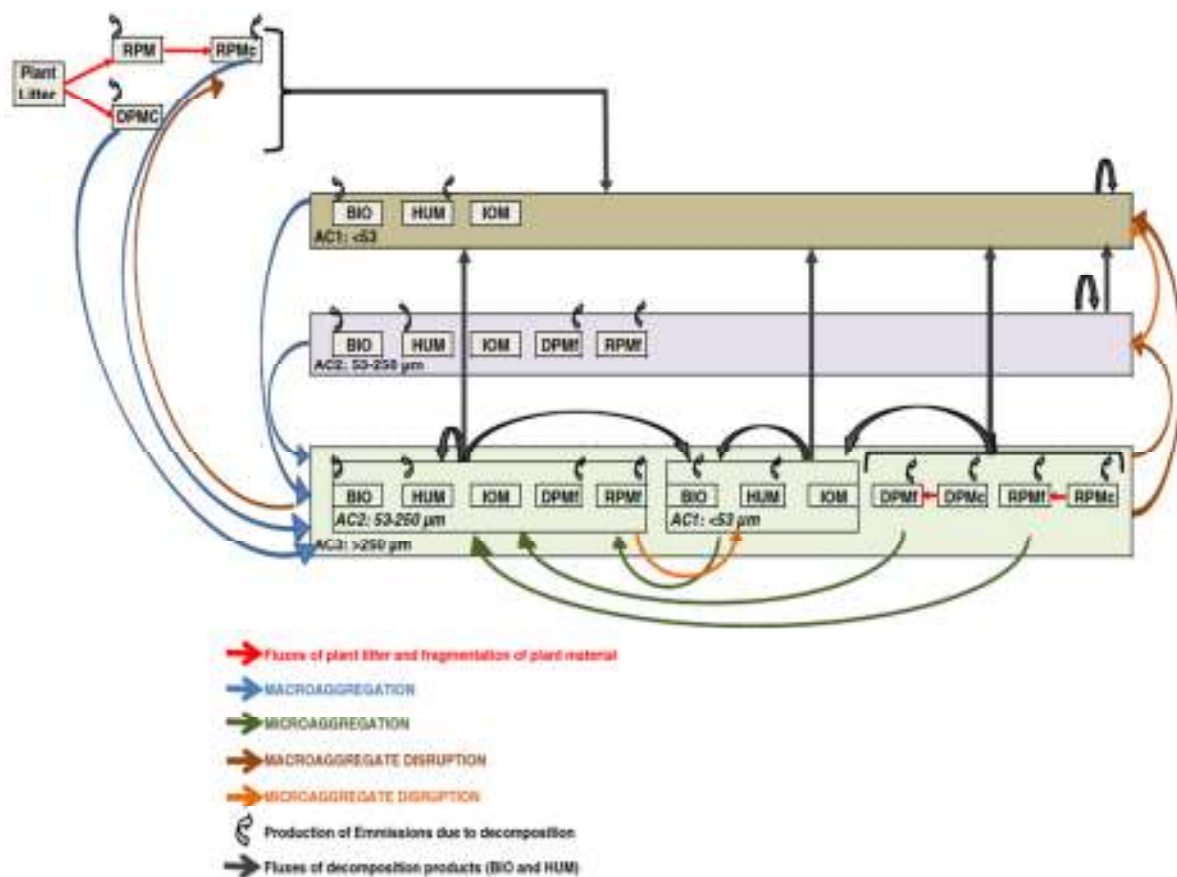
Στο Σχήμα 2 φαίνεται ο σχηματισμός και η διάσπαση των μακρο-συσσωματωμάτων, από την υπάρχουσα γνώση (Stamati et al., 2013). Το φυτικό υπόλειμμα που εισέρχεται στο έδαφος αποικείται από μικροβιακούς αποικοδομητές. Οι υφές, οι μικροβιακοί μεταβολίτες και οι ριζικές εκκρίσεις, παρέχουν το συνδετικό υλικό που ενώνει εδαφικά σωματίδια και τα μικρότερα συσσωματώματα σε μακρο-συσσωματώματα γύρω από τη ΣΟY. Τα μακρο-συσσωματώματα με τη σειρά τους αποσυντίθενται και σπάνε σε μικρότερα σωματίδια. Ένα μέρος από τη λεπτή κλασματοποιημένη ΣΟY, επιστρώνεται με ορυκτά σωματίδια (μικρο-συσσωματώματα <53 μm) και μικροβιακά υποπροϊόντα, οδηγώντας με τον τρόπο αυτό στο σχηματισμό των μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα. Η βιοαποικοδόμηση της οργανικής ύλης που αποσυντίθεται εύκολα και εμπεριέχεται στα μακρο-συσσωματώματα, οδηγεί στη μείωση της μικροβιακής δραστηριότητας, με αποτέλεσμα να περιορίζεται ο εφοδιασμός με μικροβιακά πολυμερή και τα μακρο-συσσωματώματα καθίστανται ασταθή. Σε αυτή τη φάση, αν υπάρξει απότομη διάβρωση, τα μακρο-συσσωματώματα απελευθερώνουν σταθεροποιημένα μικρο-συσσωματώματα και συσσωματώματα αργίλου-ιλύος, ενώ ταυτόχρονα η αποσυντιθέμενη ΣΟY

εκτίθεται. Τα υλικά αυτά μπορούν με τη σειρά τους να ενσωματωθούν σε νέα συσσωματώματα, όταν εισέλθει στο σύστημα φρέσκο φυτικό υπόλειμμα (Stamati et al., 2013).



Σχήμα 2: Σχηματική απεικόνιση της μακρο-συσσωμάτωσης (Stamati et al., 2013)

Η δομή του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 3. Έχει αναπτυχθεί σε MATLAB (Version 7.10.0499 (R2010a)) και στη συνέχεια σε FORTRAN 90. Τρεις τύποι συσσωματωμάτων θεωρείται ότι αποτελούνται από τις σχετικές δεξαμενές άνθρακα του RothC με ξεχωριστούς ρυθμούς χρόνου παραμονής: Το αποικοδομήσιμο φυτικό υλικό (DPM), το ανθεκτικό φυτικό υλικό (RPM), η μικροβιακή βιομάζα (BIO), η χουμική οργανική ύλη (HUM) και η αδρανής οργανική ύλη (IOM). Η αδρανής οργανική ύλη αναφέρεται στο βιοκάρβουνο το οποίο παρουσιάζει πολύ μεγάλους χρόνους παραμονής και για το λόγο αυτό θεωρείται ανθεκτική στην αποσύνθεση. Ως AC1, AC2 και AC3 ορίζονται οι τρεις τύποι συσσωματωμάτων ανάλογα με το μέγεθός τους. Ο τύπος AC1 αναφέρεται στα συσσωματώματα μεγέθους αργίλου-ιλύος (<53 μm) που αποτελούνται από (BIO), (HUM) και (IOM). Ο τύπος AC2 αναφέρεται στα μικρο-συσσωματώματα (53 – 250 μm) που αποτελούνται από (BIO), (HUM), (IOM) και λεπτής υφής (DPM) και (RPM). Τέλος, ο τύπος AC3 αναφέρεται στα μακρο-συσσωματώματα (>250 μm) και αποτελούνται από (BIO), (HUM), (IOM) και λεπτής και αδρής υφής (DPM) και (RPM) (Stamati et al., 2013).



Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση του κύκλου εργασιών του άνθρακα και των συσσωματωμάτων στο μοντέλο CAST (Stamati et al., 2013)

Επιμερισμός και κατακερματισμός εισερχόμενου φυτικού υλικού

Το φυτικό υλικό που εισέρχεται στο έδαφος αποτελείται από οργανικά υλικά τα οποία παρουσιάζουν διαφορετική αντίσταση στην αποσύνθεση. Το μοντέλο διαμοιράζει το φυτικό υπόλειμμα σε DPM και RPM, ανάλογα με το λόγο DPM/RPM που έχει οριστεί. Η δεξαμενή του DPM θεωρείται ότι αποτελείται από αδρή ΣΟΥ (53 – 250 μm) λόγω του μικρού χρόνου παραμονής. Η δεξαμενή του DPM κατακερματίζεται από γαιοσκώληκες και λοιπή πανίδα, σε αδρή ΣΟΥ (>250 μm) (RPMC). Η δεξαμενή του RPM είναι η μόνη δεξαμενή φρέσκου φυτικού υλικού, που δε συσσωματώνεται.

Σχηματισμός μακρο-συσσωματωμάτων

Όπως έχει προαναφερθεί τα μακρο-συσσωματώματα σχηματίζονται γύρω από τη ΣΟΥ μέσω των συγκολλητικών βλεννών ριζικής και μικροβιακής προέλευσης. Τα μακρο-συσσωματώματα δημιουργούνται από το εισερχόμενο φυτικό υλικό και μάλιστα από το DPM. Η συσσωμάτωση λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει φυτικό υπόλειμμα και κατάλληλες συνθήκες για τη μικροβιακή δραστηριότητα. Χωρίς την παρουσία DPM δεν σχηματίζονται συσσωματώματα. Παράλληλα τα συσσωματώματα AC1 και AC2 αποτελούν περιοριστικό παράγοντα μιας και δεν υπάρχει αντίθετη ένδειξη. Η ελεύθερη αδρή ΣΟΥ που βρίσκεται μέσα στα μακρο-συσσωματώματα, αποσυντίθεται σε λεπτή ΣΟΥ και τα μικροβιακά εκκρίματα που παράγονται καθιστούν τα μακρο-συσσωματώματα πιο σταθερά.

Σχηματισμός μικρο-συσσωματωμάτων

Ένα μέρος από το λεπτό φυτικό υπόλειμμα που εισέρχεται στο έδαφος, επιστρώνεται με ορυκτά σωματίδια και μικροβιακά υποπροϊόντα, οδηγώντας στο σχηματισμό των μικρο-συσσωματωμάτων μέσα στα μακρο-συσσωματώματα (AC2 in AC3) αυξάνοντας τη φυσική προστασία της ΣΟΥ. Το DPM δε θεωρείται περιοριστικός παράγοντας των μικρο-συσσωματωμάτων, μιας και ο χρόνος κύκλου εργασιών τους είναι κατά πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από αυτόν του DPM.

Αποσύνθεση των δεξαμενών άνθρακα

Από τα παράγωγα της αποσύνθεσης του DPM και RPM το 95% παραμένει στο συσσωμάτωμα και προστίθεται στο κλάσμα (AC1inAC3) ενώ το 5% μεταφέρεται στο ελεύθερο (AC1). Παρόμοια, το 95% που παράγεται από την αποσύνθεση των δεξαμενών που περιέχονται στο κλάσμα (AC2inAC3) παραμένει στα μικρο-συσσωματώματα, ενώ το 2,5% προστίθεται στο κλάσμα (AC1inAC3) και το υπόλοιπο 2,5% μεταφέρεται στο ελεύθερο (AC3). Με τον ίδιο τρόπο, το 95% που παράγεται από την αποσύνθεση του ελεύθερου (AC2) παραμένει στο συσσωμάτωμα ενώ το υπόλοιπο 5% μεταφέρεται στο ελεύθερο (AC1). Τα προϊόντα της αποσύνθεσης του ελεύθερου (AC1) και (AC1inAC3) παραμένουν στην ίδια δεξαμενή. Τα προϊόντα της αποσύνθεσης των δεξαμενών άνθρακα του φρέσκου οργανικού υλικού μεταφέρονται στο ελεύθερο (AC1).

Διάσπαση συσσωματωμάτων

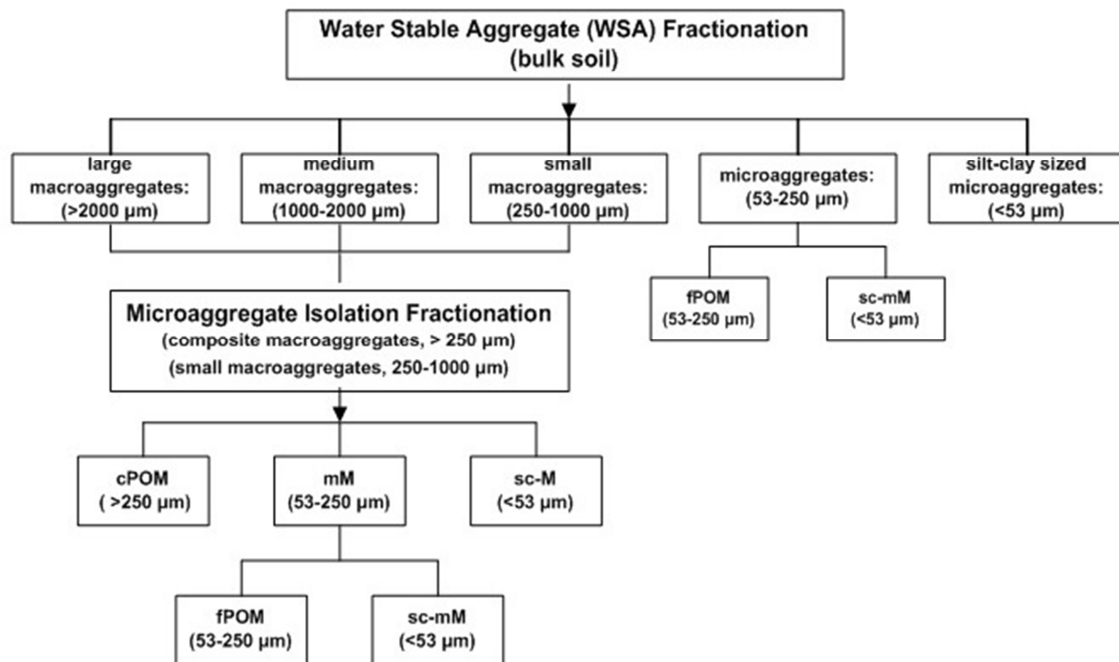
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, περαιτέρω αποσύνθεση του ενσωματωμένου οργανικού υλικού, οδηγεί σε μείωση της μικροβιακής ανάπτυξης, με αποτέλεσμα μείωση της παραγωγής μικροβιακών πολυμερών, οδηγώντας σε λιγότερο σταθερά συσσωματώματα. Σε αυτό το σημείο αν εφαρμοστεί απότομη διάβρωση, τα AC3 συσσωματώματα, απελευθερώνουν σταθερά AC2 και AC1 και εύκολα αποικοδομήσιμη ΣΟΥ μένει απροστάτευτη. Εάν υπάρχει διαθέσιμο DPM με την παρουσία των AC2 και AC1 θα σχηματιστούν AC3 συσσωματώματα. Τα AC3 μεγαλύτερης ηλικίας όμως θα επιδεινωθούν και θα καταστραφούν. Για το λόγο αυτό, ένα ποσοστό (ψευδοποσοστό) εισάγεται στο μοντέλο για τις δεξαμενές λεπτού και αδρού DPM που περιέχονται στο κλάσμα (AC3), κάτω από το οποίο τα μακρο-συσσωματώματα θεωρούνται ασταθή και δυνητικά καταστρέφονται.

Δεδομένα εισαγωγής

Τα δεδομένα εισαγωγής του μοντέλου είναι

- Μηνιαία κλιματικά δεδομένα (θερμοκρασία, βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή)
- Φυτοκάλυψη
- Εισερχόμενο υπολειμματικό φυτικό υλικό (σε τιμές άνθρακα)
- Όργανο
- Βάθος εδάφους (εδαφικού δείγματος)
- Φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους
- Περιεκτικότητα αργίλου
- Περιεκτικότητα αργίλου – ιλύος
- Λόγος DPM/RPM

Οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου ορίζονται ύστερα από τη διαδικασία της κλασμάτωσης των συσσωματωμάτων του εδάφους (fractionation) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4 που ακολουθεί (Elliott, E.T., 1986).



Σχήμα 4: Κλασμάτωση κατά (Elliott, E.T., 1986)

Οι παράμετροι βαθμονόμησης του μοντέλου είναι οι ρυθμοί διάσπασης, αποσύνθεσης και σχηματισμού των συσσωματωμάτων, η ποσοστιαία συμμετοχή των συστατικών στη συσσωμάτωση, τα ποσοστά διατάραξης κλπ.

Δεδομένα εξόδου

Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι

- Τα γραφήματα εξόδου CAST
 - Κατανομή υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων
 - Κατανομή αποθέματος εδαφικού οργανικού άνθρακα
 - Κατανομή μάζας αργίλου-ιλύος
 - Κατανομή αποθέματος BIO και HUM
 - Κατανομή αποθέματος εδαφικού οργανικού άνθρακα μέσα στα μακρο-συσσωματώματα
 - Πορώδες και φαινόμενη πυκνότητα
- Τα δεδομένα εξόδου CAST
 - Ροές άνθρακα
 - Ροές αργίλου-ιλύος
 - Αποθέματα άνθρακα

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν τρεις περιοχές ως προς τη δομή του εδάφους, τις δυναμικές του άνθρακα και την κατανομή των συσσωματωμάτων. Οι περιοχές αυτές είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη που βρίσκεται στα Χανιά, Κρήτης, η Μηλιά που βρίσκεται στα Χανιά, Κρήτης και ο παγετώνας Damma Glacier που βρίσκεται στο Uri της Ελβετίας. Σκοπός ήταν αρχικά να προσομοιωθεί η λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη και στη συνέχεια να γίνει σύγκριση με την περιοχή της Μηλιάς, η οποία βρίσκεται εκτός της λεκάνης απορροής και παρουσιάζει διαφορετικά εδαφολογικά χαρακτηριστικά και έπειτα με την περιοχή του παγετώνα ώστε να υπάρχει ακραία διαφοροποίηση και να ερμηνευτούν οι έντονες διακυμάνσεις των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης.

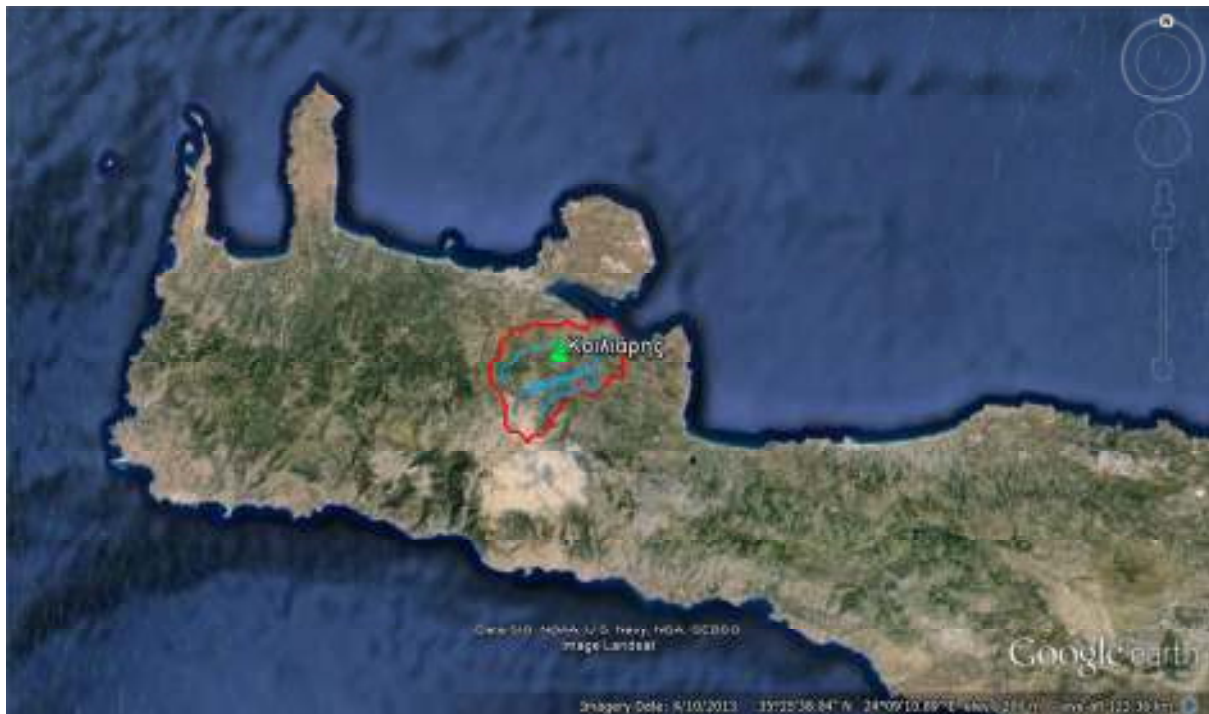
Για την προσομοίωση κάθε περιοχής έπρεπε να γίνει επιλογή των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν. Η μελέτη του εδάφους έγκειται σε επιλογή σημείων για εδαφικές δειγματοληψίες και ανάλυση των δειγμάτων με σκοπό να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων που θα εισαχθούν στο μοντέλο.

Η μοντελοποίηση των εδαφών κάθε περιοχής έγινε με το λογισμικό CAST Model V3.0 (TUC HERS LAB, 2012).

ΚΟΙΛΙΑΡΗΣ

Περιγραφή περιοχής

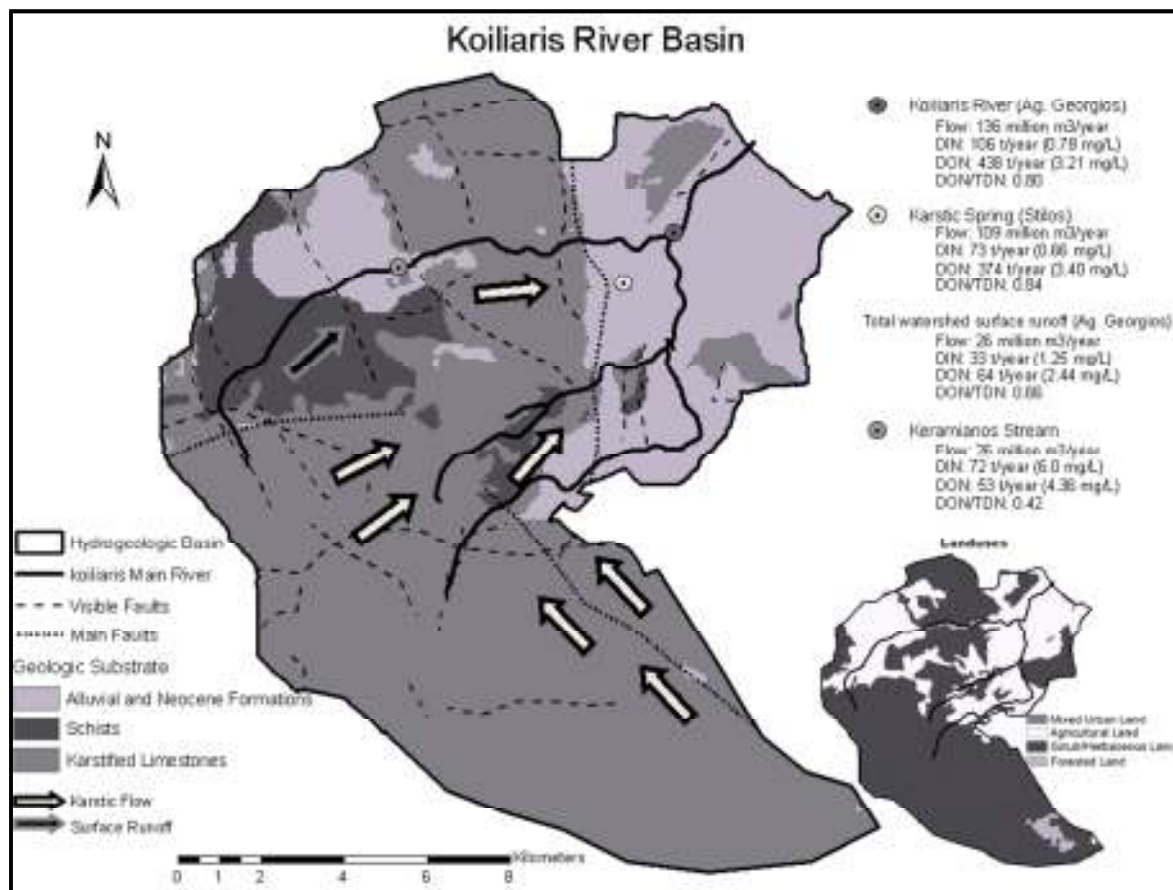
Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη βρίσκεται στο νομό Χανίων Κρήτης, 25 km ανατολικά της πόλης των Χανίων. Η ευρύτερη λεκάνη καταλαμβάνει έκταση 130 km². Το κλίμα της περιοχής είναι εύκρατο, Μεσογειακό με βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ οι καλοκαιρινοί μήνες χαρακτηρίζονται από υψηλές θερμοκρασίες και ξηρασία όπου η εξάτμιση υπερβαίνει τη βροχόπτωση οδηγώντας σε προβλήματα έλλειψης νερού στην περιοχή.



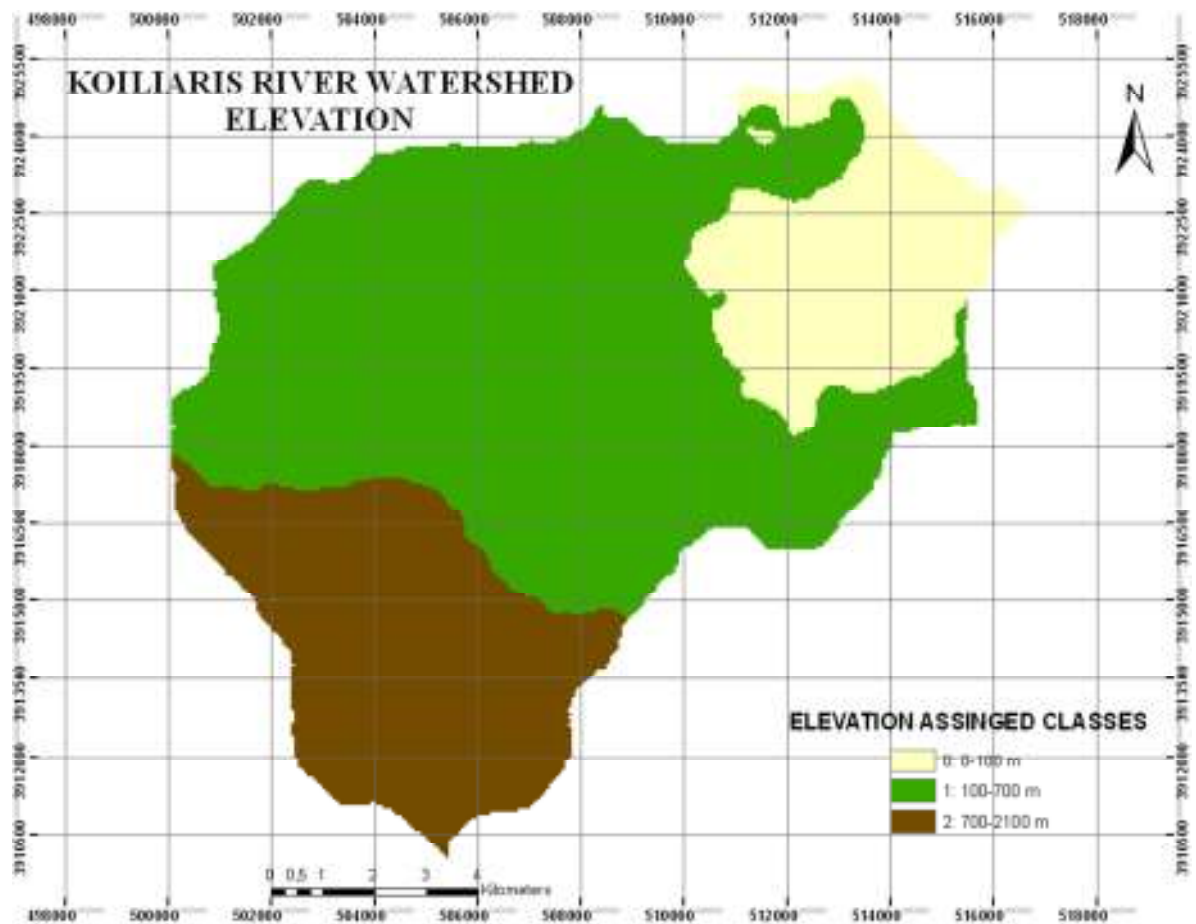
Εικόνα 6: Λεκάνη απορροής ποταμού Κοιλιάρη (Google Maps)

Η περιοχή αποτελεί διεθνές παρατηρητήριο εδαφών για την κρίσιμη ζώνη του εδάφους (Critical Zone Observatory) και αποτελείται από αλλουβιακές εναποθέσεις και καρστικούς σχηματισμούς ασβεστόλιθων και δολομιτών (Nikolaidis, 2011). Η έκταση της λεκάνης χαρακτηρίζεται από έντονη υψομετρική διαφορά η οποία μαζί με το ημιάγριο έδαφος συνεπάγεται διαφορετικές κλιματικές συνθήκες στην περιοχή (Nikolaidis, 2011). Το έδαφος της λεκάνης χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές λιθολογίες, Μάργες, Ασβεστόλιθους Τρυπαλίου και Σχιστόλιθους.

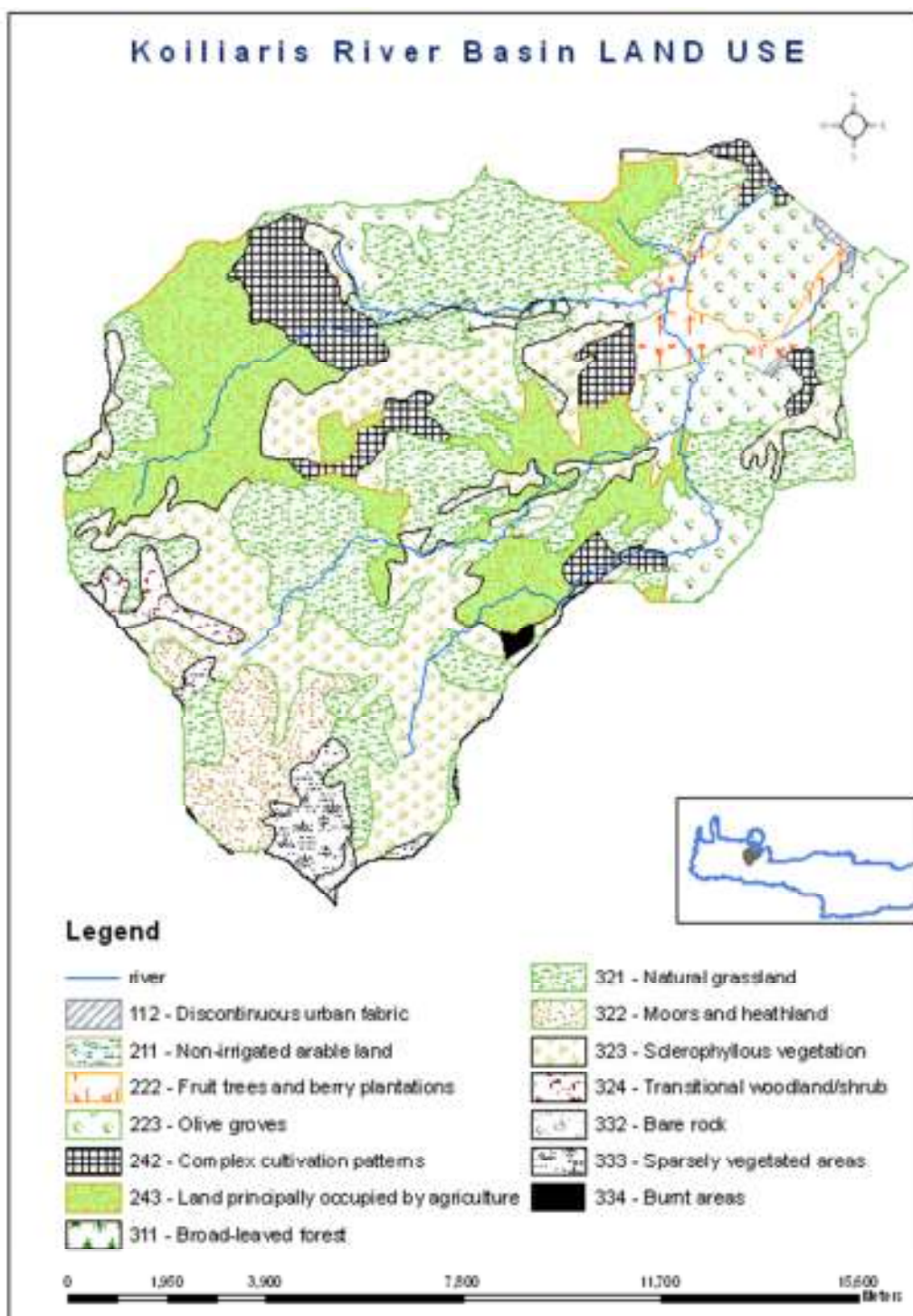
Η βλάστηση της περιοχής αποτελείται κυρίως από καλλιεργήσιμες εκτάσεις με ελιές, πορτοκαλιές, λεμονιές, αμπέλια και λαχανικά σε μικρά υψόμετρα (9–383m) και κατά μικρότερο ποσοστό, από θαμνώδεις εκτάσεις πάνω σε ασβεστόλιθους (592-1098m) από τις οποίες τρέφονται εντατικά αιγοπρόβατα.



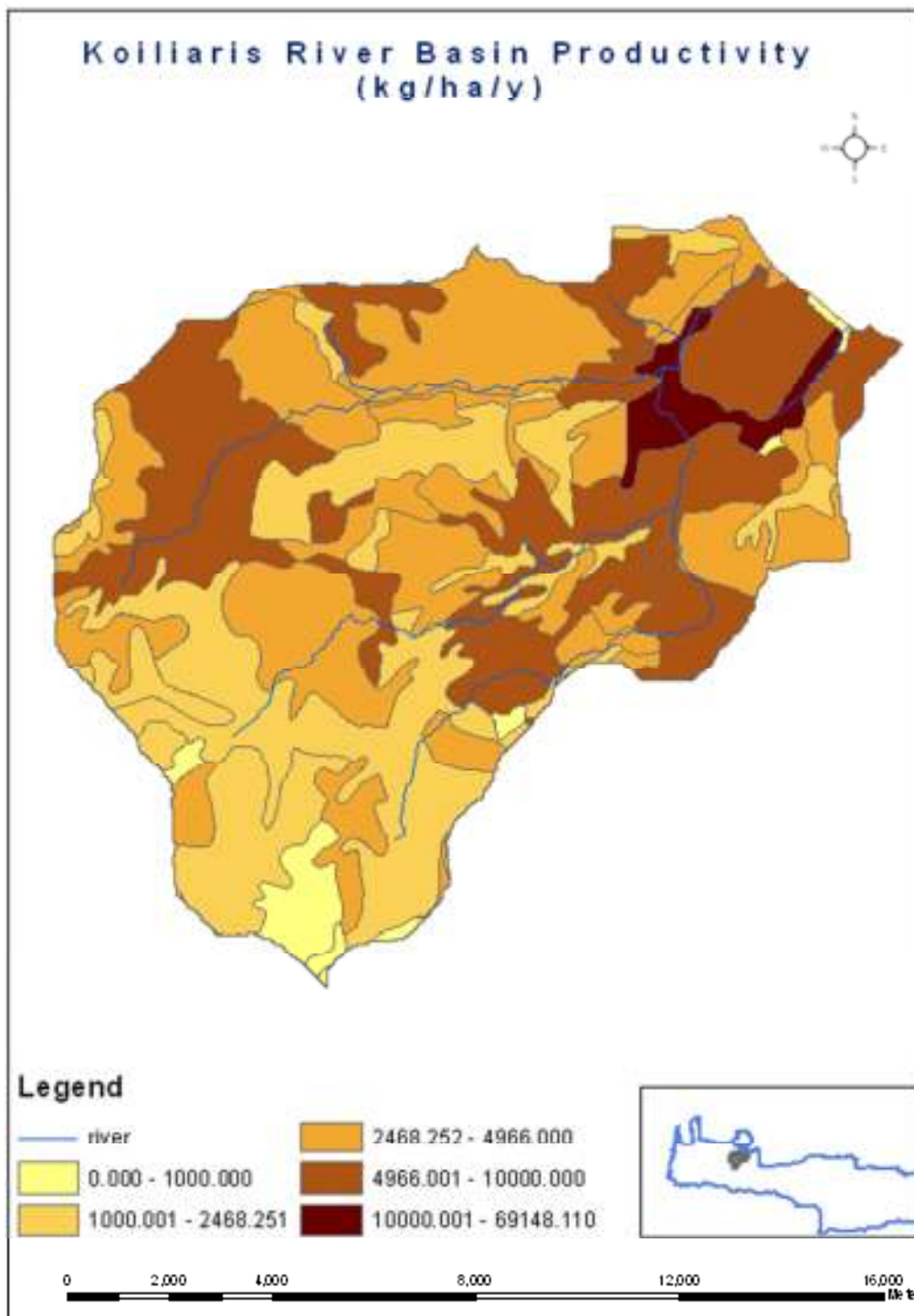
Χάρτης 1: Γεωλογικοί σχηματισμοί, χρήσεις γης, υδρολογική ροή και ροή θρεπτικών στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κουιλάρη (Stamati, 2012).



Χάρτης 2: Ταξινόμηση της χαρτογράφησης του περιγράμματος του υψομέτρου (τα ψηφιακά δεδομένα που τέθηκαν έχουν προέλθει από τη βάση δεδομένων της περιοχής της Κρήτης - Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Stamati, 2012)



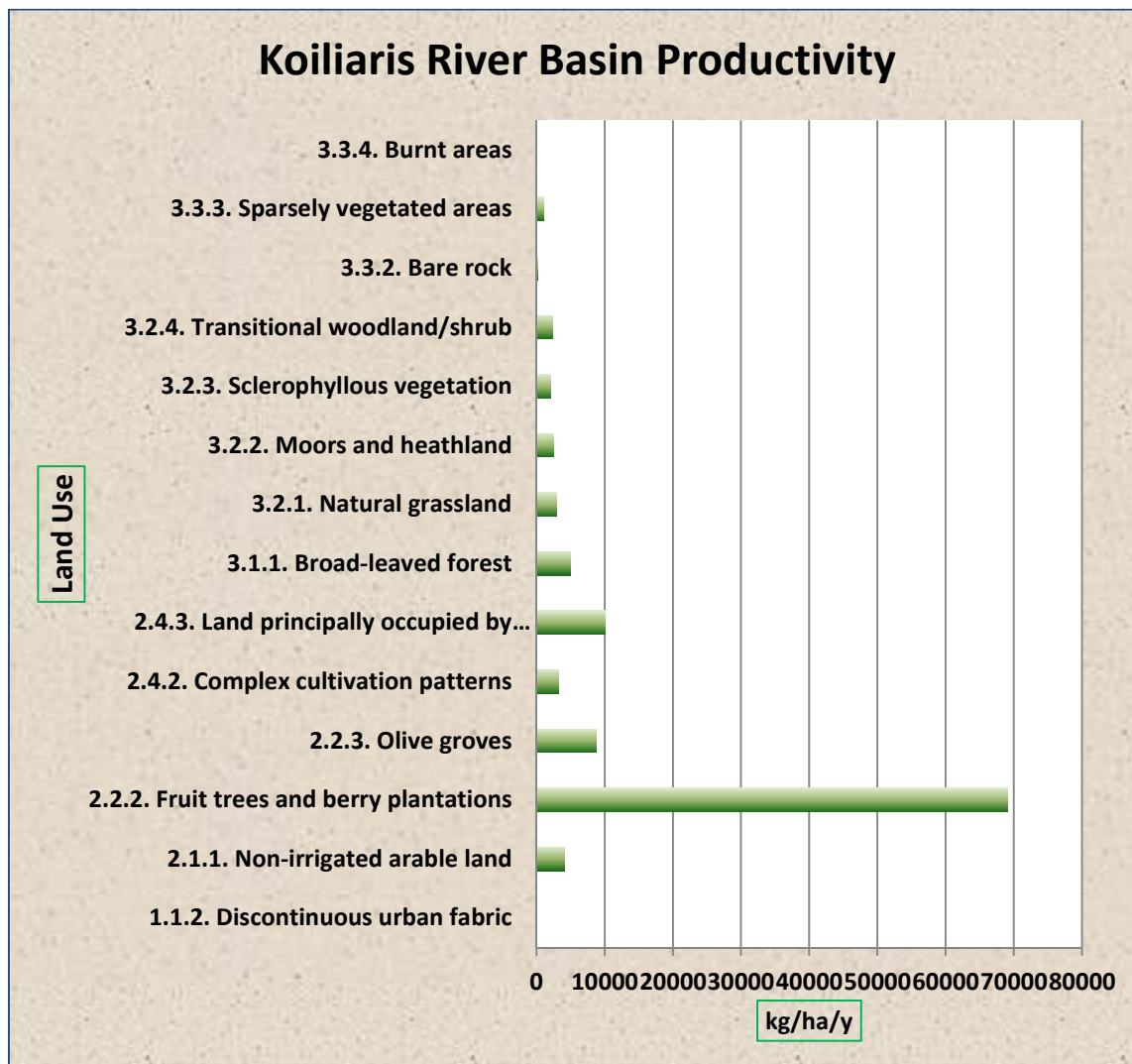
Χάρτης 3: Χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής του Κουιάρη



Χάρτης 4: Παραγωγικότητα χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη

Οι χάρτες 3 και 4 των χρήσεων γης και της παραγωγικότητας της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, έχουν προκύψει από επεξεργασία δεδομένων της Στατιστικής Υπηρεσίας.

Στο γράφημα που ακολουθεί φαίνεται η παραγωγικότητα στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, για κάθε χρήση γης



Διάγραμμα 2: Παραγωγικότητα χρήσεων γης στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κουιλιάρη

Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη παραγωγή αφορά τα σπρωφόρα δέντρα και ακολουθούν οι γεωργικές καλλιέργειες και οι ελαιώνες. Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι η κατηγορία των ελαιώνων στις χρήσεις γης, περιλαμβάνει και τα αμπέλια.

Μελέτη εδάφους και δεδομένα προσομοίωσης

Στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κουιλιάρη προσομοιώθηκαν τρεις ομάδες σημείων με το μοντέλο Cast. Σκοπός ήταν να χρησιμοποιηθούν σημεία με διαφορετική λιθολογία για πιο αντιπροσωπευτική περιγραφή της λεκάνης απορροής λόγω της διαφορετικότητας που παρουσιάζει σε λιθολογία, χρήσεις γης, ανάγλυφο κλπ.

Για κάθε ομάδα προσομοίωσης παίρνονται δείγματα από δυο σημεία. Το ένα σημείο βρίσκεται σε έδαφος που καλλιεργείται ενώ το δεύτερο βρίσκεται σε έδαφος που έχει μείνει ακαλλιέργητο. Σκοπός είναι οι τιμές από τις μετρήσεις του καλλιεργούμενου εδάφους να χρησιμοποιηθούν σαν αρχικές συνθήκες στο μοντέλο και οι τιμές από τις μετρήσεις του ακαλλιέργητου εδάφους να χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Τα σημεία αυτά βρίσκονται πολύ κοντά ώστε να έχουμε δείγματα εδάφους με ίδια χαρακτηριστικά.

1^η Ομάδα προσομοίωσης (Σχιστόλιθοι)

Για την πρώτη ομάδα προσομοίωσης έγινε δειγματοληψία από δυο σημεία. Τα σημεία αυτά είναι τα 25Γ και 16Α (Stamati, 2012) όπου το 25Γ χρησιμοποιήθηκε για τις αρχικές συνθήκες και το 16Α για τη βαθμονόμηση. Το σημείο 25Γ (00503033Ε, 03920273Ν) βρίσκεται σε υψόμετρο 290 μέτρων, σε σχιστολιθικό σχηματισμό και καλλιεργείται με ελαιόδεντρα. Το σημείο 16Α (00513581Ε, 03917909Ν) βρίσκεται σε υψόμετρο 219 μέτρων, σε Μάργες και καλύπτεται από θαμνώδη και ποώδη φυτά.

2^η Ομάδα προσομοίωσης (Μάργες)

Για τη δεύτερη ομάδα προσομοίωσης έγινε δειγματοληψία από δυο σημεία. Τα σημεία αυτά είναι τα 6Β και 9Β (Stamati, 2012) όπου το 6Β χρησιμοποιήθηκε για τις αρχικές συνθήκες και το 9Β για τη βαθμονόμηση. Το σημείο 6Β (00509695Ε, 03915771Ν) βρίσκεται σε υψόμετρο 383 μέτρων, σε Μάργες και καλλιεργείται με ελαιόδεντρα. Το σημείο 9Β βρίσκεται σε Μάργες και καλύπτεται από θαμνώδη και ποώδη φυτά.

3^η Ομάδα προσομοίωσης (Ασβεστόλιθοι)

Για την τρίτη ομάδα προσομοίωσης έγινε δειγματοληψία από δυο σημεία. Τα σημεία αυτά είναι τα 10Γ και 4Α (Stamati, 2012) όπου το 10Γ χρησιμοποιήθηκε για τις αρχικές συνθήκες και το 4Α για τη βαθμονόμηση. Το σημείο 10Γ (00509473Ε, 03919128Ν) βρίσκεται σε υψόμετρο 375 μέτρων, σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς και καλλιεργείται με ελαιόδεντρα. Το σημείο 9Β (00509271Ε, 03920673Ν) βρίσκεται σε υψόμετρο 308 μέτρων, σε ασβεστολιθικούς σχηματισμούς και καλύπτεται από θαμνώδη και ποώδη φυτά.

Η προσομοίωση του μοντέλου για κάθε ομάδα εδαφών έγινε για 60 χρόνια. Τα δεδομένα εισαγωγής και οι παράμετροι βαθμονόμησης του μοντέλου βρίσκονται στο Παράρτημα.

ΜΗΛΙΑ

Περιγραφή περιοχής

Η Μηλιά βρίσκεται σε υψόμετρο 500 m στην επαρχία Κισσάμου του Νομού Χανίων. Είναι χτισμένη στην πλαγιά του βουνού και περιτοιχίζεται από ένα μοναδικό φυσικό περιβάλλον, που καλύπτεται από μία πολύ μεγάλη ποικιλία φυτών και δέντρων.

Το 1982 πάρθηκε η απόφαση της περιβαλλοντικής αναβάθμισης και αναστύλωσης του μεσαιωνικού οικισμού. Όμως η αλόγιστη συμπεριφορά (φωτιές, υπερβόσκηση) οδήγησε στη διάβρωση του εδάφους και την ελαχιστοποίηση του νερού, το οποίο αποτελεί ζωτικό στοιχείο για τον τόπο. Άρχισε η συστηματική καλλιέργεια και μερικές χιλιάδες δέντρα φυτεύτηκαν, τα περισσότερα από τα οποία είναι ενδημικά. Έγινε περίφραξη και αναπτύχθηκαν αντιτυρικές ζώνες στην περίμετρο του κτήματος. Το 1991 ξεκίνησαν οι εργασίες αναστύλωσης και ολοκληρώθηκαν το 1994.

Τα πετρώματα από τα οποία αποτελείται κυρίως το έδαφος είναι σχιστόλιθοι, φυλλίτες και χαλαζίτες.



Εικόνα 7: Θέση Μηλιάς στο χάρτη και απόσταση από τη λεκάνη απορροής του Κουλιάρη (Google Maps)

Μελέτη εδάφους και δεδομένα προσομοίωσης

Για την περιοχή της Μηλιάς επιλέχθηκε προς μελέτη ένα χωράφι το οποίο καλλιεργούταν για οχτώ χρόνια ενώ τα δύο τελευταία βρισκόταν σε αγρανάπαυση. Κατά την καλλιέργειά του γινόταν προσθήκη εδαφοβελτιωτικού (compost) δύο φορές το χρόνο, με συνολική ετήσια προσθήκη άνθρακα 8 t/ha. Τα δεδομένα από την επεξεργασία των δειγμάτων (ΒΑΒΛΑΣ, 2013) χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό να προσομοιωθεί το χωράφι για το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει και να γίνει η σύγκριση με τη λεκάνη απορροής του Κουλιάρη.



Εικόνα 8: Σημείο δειγματοληψίας Μηλιάς (ΒΑΒΛΑΣ, 2013)

Στην περίπτωση της Μηλιάς έγινε βαθμονόμηση του μοντέλου με εισαγωγή άνθρακα από την εισροή του φυτού στο έδαφος (litter fall). Επειδή δεν μετρήθηκε η βιομάζα του φυτού πάνω από το

έδαφος, βρέθηκε στη βιβλιογραφία ένα εύρος τιμών που να αφορούν τις θαμνώδεις εκτάσεις. Μια μέση μηνιαία τιμή για θαμνώδεις εκτάσεις είναι 0,175 t C/ha (ΒΑΒΛΑΣ, 2013) ενώ μια τιμή για λειμώνες είναι 0,2083 t C/ha (ΒΑΒΛΑΣ, 2013). Στην περίπτωση της Μηλιάς, χρησιμοποιήθηκε το χωράφι στο οποίο εφαρμόστηκε εδαφοβελτιωτικό (compost) για 8 χρόνια (7.8 t C/ha/year) και τα 2 τελευταία χρόνια βρίσκεται σε αγρανάπαυση. Η δειγματοληψία έγινε το 10^ο έτος και το μοντέλο βαθμονομήθηκε για την περίπτωση προσθήκης εδαφοβελτιωτικού με όργωμα (compost-tilling) (ΒΑΒΛΑΣ, 2013). Τα δεδομένα για τη μοντελοποίηση για άλλα 60 χρόνια αλλάζουν ως προς την εισροή φυτού (plant input) και το όργωμα (tilling). Αυξάνουμε την εισροή φυτού (plant input) από τη στιγμή που το χωράφι μένει ακαλλιέργητο και αφαιρούμε το όργωμα (tilling) τα επόμενα χρόνια. Σαν αποτέλεσμα έχουμε τον παρακάτω πίνακα για την εισροή φυτού (plant input).

Πίνακας 1: Μηνιαίες τιμές εισροής φυτικού υπολείμματος στην περιοχή της Μηλιάς

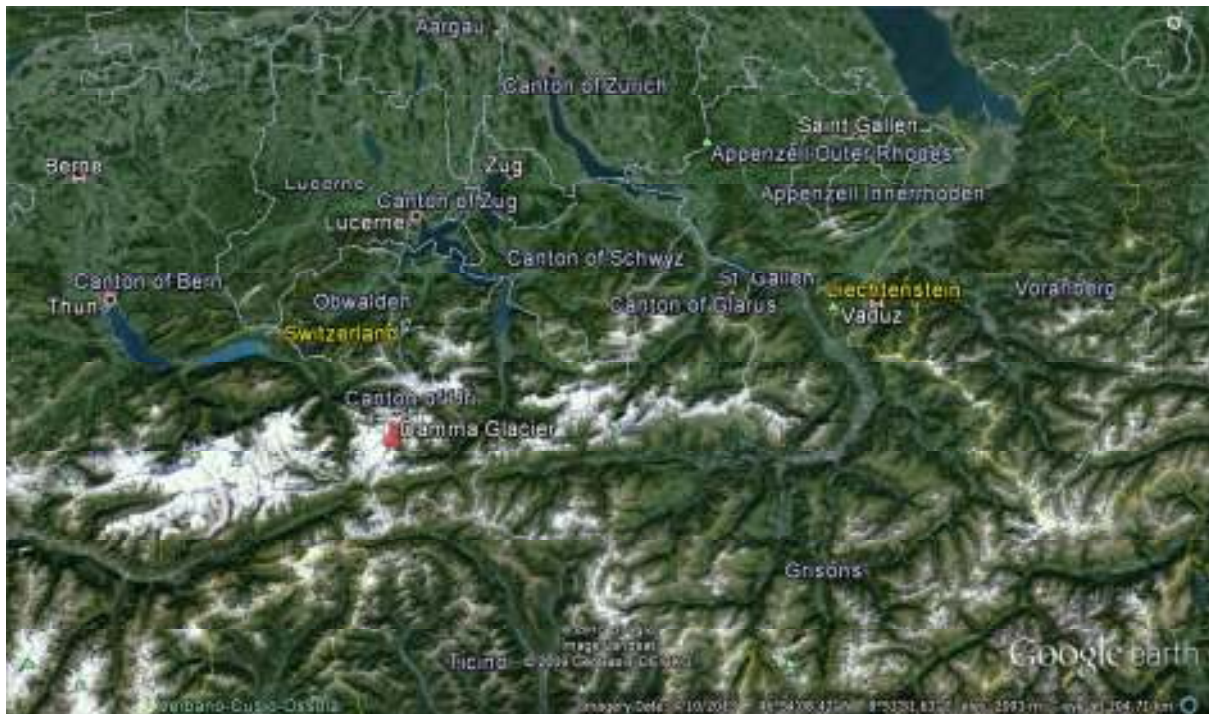
Έτη	1 – 8	9 – 12	13	14	15 – 30	30 – 70
Εισροή φυτού (t C/ha/month)	0 (μόνο εδαφοβελτιωτικό)	0.0100	0.0500	0.1000	0.1750	0.2083

Η προσομοίωση της Μηλιάς θα κριθεί σε δυο φάσεις. Σε πρώτη φάση θα υπολογιστούν οι ροές του άνθρακα τα πρώτα χρόνια που γίνεται προσθήκη εδαφοβελτιωτικού και σε δεύτερη φάση θα υπολογιστούν οι ροές του άνθρακα για 60 χρόνια προκειμένου να συγκριθούν με τις προσομοιώσεις των τριών ομάδων του Κοιλιάρη και με το Damma.

DAMMA GLACIER

Περιγραφή περιοχής

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στις κεντρικές Άλπεις, στην περιοχή (καντόνι) του Ούρι, στην Ελβετία, μπροστά από τον παγετώνα Damma, σε ύψος που κυμαίνεται από 1950 έως 2050 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Το κλίμα χαρακτηρίζεται από σύντομη περίοδο βλάστησης (τέλη Ιουνίου μέχρι μέσα Οκτωβρίου) και από ετήσια κατακρήμνιση 2400 χιλιοστά. Το υπόβαθρο (bedrock) αποτελείται από χονδρόκοκκο γρανίτη που αποτελείται κυρίως από χαλαζία, πλαγιόκλαστα, καλιούχο άστροιο, βιοτίτη και μοσχοβίτη (Menon et al., 2014).



Εικόνα 9: Θέση Damma Glacier (Google Maps)

Η περιοχή αποτελεί Παρατηρητήριο της Κρίσιμης Ζώνης του εδάφους και παρέχει μια εδαφική χρονοσειρά 150 ετών. Δίνεται η δυνατότητα μελέτης των πρώιμων εδαφών και της γέννησης των οικοσυστημάτων με ταυτόχρονη καταγραφή της ραγδαίας βιολογικής εξέλιξης και της επίδρασης της στη χημεία του εδάφους και τη χημική αποσάθρωση. (Bernasconi et al., 2011).

Το μπροστινό μέρος του βορειοανατολικού εκτιθέμενου παγετώνα έχει υποχωρήσει με ένα μέσο ετήσιο ρυθμό των 10 μέτρων, μετά από ετήσιες συστηματικές μετρήσεις από το 1921 με αποκορύφωμα το 2003, όπου ένα μεγάλο κομμάτι πάγου αποσπάστηκε από τον κύριο παγετώνα και απομένει στην κοιλάδα.

Η ύφεση του παγετώνα δεν υπήρξε συνεχής αλλά αντιστράφηκε από το 1920 έως το 1928 και ξανά το 1970 έως το 1992, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν δυο σωροί λίθων που ονομάζονται moraine. Δημιουργούνται από πέτρες που μεταφέρει ο παγετώνας όταν 'μεγαλώνει' και ορίζουν το σημείο μέχρι το οποίο έφτασε. Εξαιτίας αυτών των εκ νέου προωθήσεων, η χρονολόγηση του εδάφους δεν είναι συνεχής και αποτελείται από τρεις ομάδες ηλικίας εδαφών. Τα νεώτερα σημεία περιλαμβάνουν εδάφη ηλικίας 2 έως 18 ετών, η ενδιάμεση ομάδα περιλαμβάνει εδάφη που απελευθερώθηκαν από τον πάγο μεταξύ του 1930 και του 1950, ενώ η γηραιότερη ομάδα περιλαμβάνει εδάφη που άρχισαν να σχηματίζονται μεταξύ του 1870 και του 1897. Τα εδάφη στο ενδιάμεσο διαβρώθηκαν κατά τη διάρκεια της προώθησης του παγετώνα. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει μια σημαντική χρονοσειρά μελέτης των εδαφών κατά την οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε τις μεταβολές του εδάφους με το χρόνο.

Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκε η περιοχή αυτή, είναι ακριβώς αυτή η χρονοσειρά. Το έδαφος εκτίθεται μετά την υποχώρηση του παγετώνα και αποικίζεται από ζωντανούς οργανισμούς, λειχήνες και φυτά. Αυτό οδηγεί στο σχηματισμό αρχικών οικοσυστημάτων και μιας εδαφικής χρονοσειράς που παρουσιάζει τα στάδια σχηματισμού του εδάφους και της ανάπτυξης της βλάστησης (Andrianaki, 2014). Παράλληλα η περιοχή χαρακτηρίζεται από ακραίες κλιματικές συνθήκες, πολύ νέα εδάφη και σύντομες περιόδους βλάστησης. Τα νέα εδάφη χαρακτηρίζονται

από χαμηλή φυτοποικιλότητα, χαμηλή περιεκτικότητα ΕΟΑ, ενώ παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε αποικιακά βακτήρια (Andrianaki, 2014). Έχει λοιπόν μεγάλο ενδιαφέρον να χρησιμοποιηθεί το ίδιο μοντέλο για τόσο διαφορετικές περιπτώσεις εδαφών ώστε να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητά του.

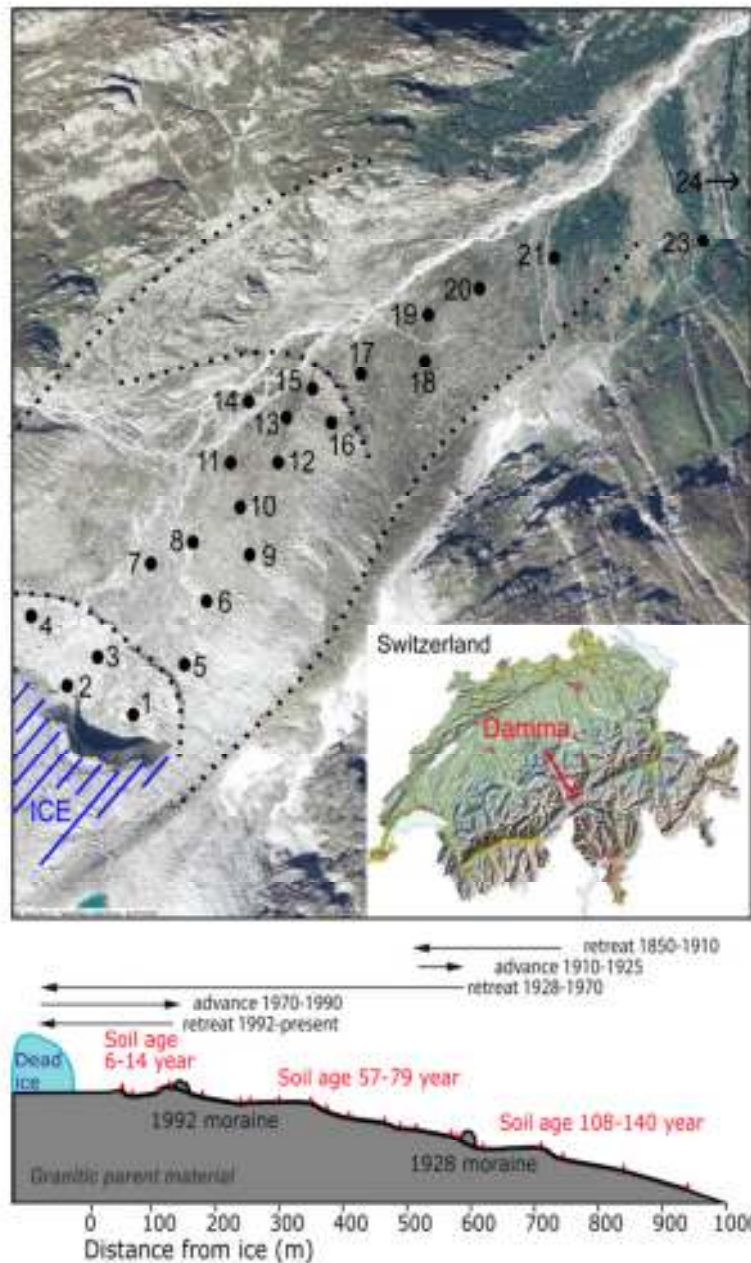


Εικόνα 10: Θέση όλων των περιοχών προσομοίωσης (Google Maps)

Μελέτη εδάφους και δεδομένα προσομοίωσης

Η προσομοίωση για την περιοχή του Damma έγινε από συνεργάτες στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος SOILTREC, με χρήση των δεδομένων από τις δειγματοληψίες που πραγματοποιήθηκαν από το πανεπιστήμιο ETH Zurich της Ελβετίας. Η μοντελοποίηση έγινε για 5 περιόδους προκειμένου να γίνει καλύτερη προσομοίωση με αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Οι τρεις περίοδοι αφορούν τις τρεις διαφορετικές ηλικίες εδαφών, ενώ οι άλλες δυο αφορούν την επαναπροώθηση του παγετώνα τις περιόδους 1920 – 1928 και 1970 – 1992.

Όπως προαναφέρθηκε, η προσομοίωση της περιοχής Damma Glacier έγινε για περιόδους που αφορούν τις τρεις διαφορετικές ηλικιακές ομάδες εδαφών και τις δύο περιπτώσεις που ξαναμεγάλωσε ο παγετώνας. Τα σημεία των δειγματοληψιών φαίνονται στον ακόλουθο χάρτη. Η ηλικία του εδάφους σε κάθε σημείο υπολογίστηκε από την απόσταση του σημείου από το 'νεκρό' πάγο, δηλαδή τα moraine του 1992 και του 1928.



Εικόνα 11: Θέση των σημείων δειγματοληψίας στο πεδίο Damma Glacier, με τις εκτιμήσεις της ηλικίας με βάση την ιστορία υποχώρησης των παγετώνων (Bernasconi et al., 2011)



Εικόνα 12: Νέα εδάφη - Εδάφη ενδιάμεσης ηλικίας - Εδάφη μεγάλης ηλικίας Damma Glacier

Στις φωτογραφίες φαίνονται τρία σημεία δειγματοληψίας στο Damma, που αντιπροσωπεύουν τα τρία ηλικιακά γκρουπ του εδάφους, δείχνοντας την προοδευτική ανάπτυξη της βλάστησης και του εδάφους στο βάθος της χρονοσειράς.

Νέας ηλικίας τοποθεσίες

Οι νεότερες τοποθεσίες βρίσκονται μεταξύ του moraine του 1992 και του νεκρού πάγου και έχουν απαλλαγεί από τον πάγο εδώ και 6 έως 13 έτη. Χαρακτηρίζονται από γυμνούς βράχους, μεγάλες πέτρες και χαλίκια με αμμώδη ιλύ μεταξύ των ογκόλιθων. Η βλάστηση είναι σπάνια και αποσπασματική, κυρίως με βρύα, λειχήνες πλατύφυλλα και πρασινάδες. Η περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα στα αρχόμενα αυτά εδάφη, είναι πολύ χαμηλή και κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 0,4 %.

Ενδιάμεσης ηλικίας τοποθεσίες

Οι τοποθεσίες ενδιάμεσης ηλικίας εδάφους προσδιορίζονται μεταξύ των moraines του 1992 και του 1928 και απελευθερώθηκαν από τον πάγο μεταξύ του 1950 και 1930. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού εύρους, η βλάστηση αυξάνεται από μερική σε πλήρη. Τα εδάφη παρουσιάζουν μια καλύτερα ανεπτυγμένη δομή, περιλαμβάνοντας ένα στρώμα φυτικού απορρίμματος σε σύγκριση με τα νεώτερα εδάφη. Η περιεκτικότητα του οργανικού άνθρακα στα πρώτα 5 εκατοστά του εδάφους αυξάνεται, με κάποια διασπορά, εκθετικά σε συνάρτηση με την ηλικία, από 0,2% σε 2% περίπου. Υπάρχει κάποια ετερογένεια όσον αφορά τις διαφορετικές αποστάσεις από το ποτάμι, για παράδειγμα στην υγρασία του εδάφους, πράγμα το οποίο αντανακλάται στον τύπο της βλάστησης.

Μεγάλης ηλικίας τοποθεσίες

Οι θέσεις του εδάφους κάτω από το moraine του 1928 προέρχονται από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Η φυτοκάλυψη είναι πλήρης και χαρακτηρίζεται από ξυλώδη φυτά. Οι εδαφικοί ορίζοντες είναι ξεκάθαρα ορατοί και η περιεκτικότητα του ολικού οργανικού άνθρακα στα 5 πρώτα εκατοστά του εδάφους ποικίλει από 1,2 έως 4 %.

Υπάρχουν δυο σημεία αναφοράς τα οποία δεν επηρεάζονται από εναπόθεση λόγω διάβρωσης από παραπάνω και προστατεύονται φυσικά. Και στα δυο αυτά σημεία η περιεκτικότητα του ολικού οργανικού άνθρακα στα 5 πρώτα εκατοστά, κυμαίνεται στο 10%.

Όπως τονίσαμε, στην περίπτωση του Damma υπάρχει μια χρονοσειρά 136 ετών, κατά τη διάρκεια της οποίας ο παγετώνας ξαναμεγάλωσε 2 φορές με αποτέλεσμα να έχουμε 5 περιόδους προσομοίωσης. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε ξεχωριστά για κάθε περίοδο. Η πρώτη περίοδος αφορά τα νέα εδάφη. Η τρίτη αφορά τα εδάφη μεσαίας ηλικίας και η πέμπτη τα μεγαλύτερα εδάφη. Οι δεύτερη και τέταρτη, είναι οι περίοδοι που πραγματοποιήθηκε επαναπροώθηση του παγετώνα.

Οι (Andrianaki, 2014) προσομοίωσαν την περιοχή με το CAST και τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση. Παρόλο που στο Damma η περιεκτικότητα αργίλου είναι χαμηλή, το CAST μοντελοποιεί ρεαλιστικά τα αρχικά στάδια σχηματισμού της δομής του εδάφους, ενώ παράλληλα προσομοιώνει επαρκώς την περιεκτικότητα του άνθρακα στα συσσωματώματα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των περιοχών που προσομοιώθηκαν με το μοντέλο CAST συνοψίζονται στον Πίνακα 2

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά περιοχών προσομοίωσης

	Κουλιάρης	Μηλιά	Damma Glacier
Υπόστρωμα	Σχιστόλιθοι Μάργες Ασβεστόλιθοι	Σχιστόλιθοι Φυλλίτες Χαλαζίτες	Γρανίτης
Έδαφος	Silt loam	Sandy loam	Sand/Loamy sand
Μέση θερμοκρασία (°C)	18.1	17.7	3.5
DPM to RPM ratio	0.67 1.00 0.70	0.45	1.44

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ

Οι περιοχές που μελετήθηκαν θα συγκριθούν ως προς τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το μοντέλο CAST. Σε πρώτο επίπεδο θα γίνει σύγκριση με βάση τα διαγράμματα και τις ροές άνθρακα που εξάγονται από το μοντέλο και σε δεύτερο επίπεδο θα γίνει σύγκριση με βάση τις παραμέτρους βαθμονόμησης του μοντέλου. Επειδή το μοντέλο απαιτεί τη βαθμονόμηση μεγάλου αριθμού παραμέτρων, η σύγκριση επιλέχθηκε να γίνει με βάση τις παραμέτρους θρυμματισμού (fragmentation), μικρο-συσσωμάτωσης (microaggregation), μακρο-συσσωμάτωσης (macroaggregation), αποσύνθεσης (decomposition), διάσπασης (disruption) και συνεισφοράς στη συσσωμάτωση (proportional contribution).

Στον Πίνακα 3 φαίνονται οι παράμετροι του CAST που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση των περιοχών, με μια σύντομη περιγραφή τους.

Πίνακας 3: Παράμετροι βαθμονόμησης για σύγκριση αποτελεσμάτων

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΡΥΘΜΟΥ (1/γ)	ΟΡΙΣΜΟΣ
Fragmentation	Θρυμματισμός
RPM to RPMc RPMc to RPMf RPMc(AC3) to RPMf(AC3) DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	Ρυθμοί θρυμματισμού του φυτικού υλικού που εισέρχεται στο έδαφος και φυτικού υλικού που βρίσκεται μέσα στα μακρο-συσσωματώματα
Macroaggregation	Μακροσυσσωμάτωση
RPMc DPMc	Ρυθμός αδρού φυτικού υλικού μακρο-συσσωμάτωσης
Microaggregation	Μικροσυσσωμάτωση

k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	Ρυθμός λεπτού φυτικού υλικού μικρο- συσσωμάτωσης μέσα στα μακρο- συσσωματώματα
Decomposition	Αποσύνθεση
Fresh plant input	Φρέσκου φυτικού υλικού
DPM RPM RPMc RPMf	Ρυθμοί αποσύνθεσης φυτικού υλικού που εισέρχεται στο έδαφος (ανθεκτικού και εύκολα αποσυντιθέμενου)
AC3 aggregate type	Μακρο-συσσωματωμάτων
RPMc within AC3 RPMf within AC3 DPMc within AC3 DPMf within AC3 BIO(AC1) within AC3 HUM(AC1) within AC3 BIO(AC2) within AC3 HUM(AC2) within AC3 RPMf(AC2) within AC3 DPMf(AC2) within AC3	Ρυθμοί αποσύνθεσης μέσα στα μακρο- συσσωματώματα (Τα παράγωγα της αποσύνθεσης BIO και HUM μεταφέρονται στα AC2 και AC1 μέσα στα AC3 και στα ελεύθερα AC1)
AC2 aggregate type	Μικρο-συσσωματωμάτων
BIO(AC2) HUM(AC2) RPMf(AC2) DPMf(AC2)	Ρυθμοί αποσύνθεσης μικρο-συσσωματωμάτων (Τα παράγωγα της αποσύνθεσης BIO και HUM μεταφέρονται στα ελεύθερα AC1 αλλά και στα AC2)
AC1 aggregate type	Συσσωματωμάτων < 53 μm
BIO(AC1) HUM(AC1)	Ρυθμός αποσύνθεσης AC1 (Τα παράγωγα της αποσύνθεσης μεταφέρονται ξανά στα AC1)
Proportional contribution of the components in aggregation	Αναλογία συνεισφοράς στη συσσωματώωση
Macroaggregation	Συνεισφορά στη μακρο-συσσωματώωση
RPMc DPMc AC1 AC2	Αναλογία συνεισφοράς του φυτικού υλικού, των AC2 και AC1 στη δημιουργία μακρο- συσσωματωμάτων
Microaggregation	Συνεισφορά στη μικρο-συσσωματώωση
RPMf within AC3	Αναλογία συνεισφοράς του φυτικού υλικού και

DPMf within AC3 AC1 within AC3	των AC1 που βρίσκονται μέσα στα μακρο- συσσωματώματα για το σχηματισμό μικρο- συσσωματωμάτων
Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable	Το κλάσμα του fDPM+cDPM στα AC3, κάτω από το οποίο τα μακρο-συσσωματώματα θεωρούνται ασταθή και σπάνε
Fraction of the fDPM+cDPM within micro- aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable	Το κλάσμα του fDPM+cDPM στα AC2 μέσα στα AC3, κάτω από το οποίο τα μακρο- συσσωματώματα θεωρούνται ασταθή και σπάνε
Fraction of the fDPM+cDPM within micro- aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable	Το κλάσμα του fDPM+cDPM στα AC2, κάτω από το οποίο τα μακρο-συσσωματώματα θεωρούνται ασταθή και σπάνε

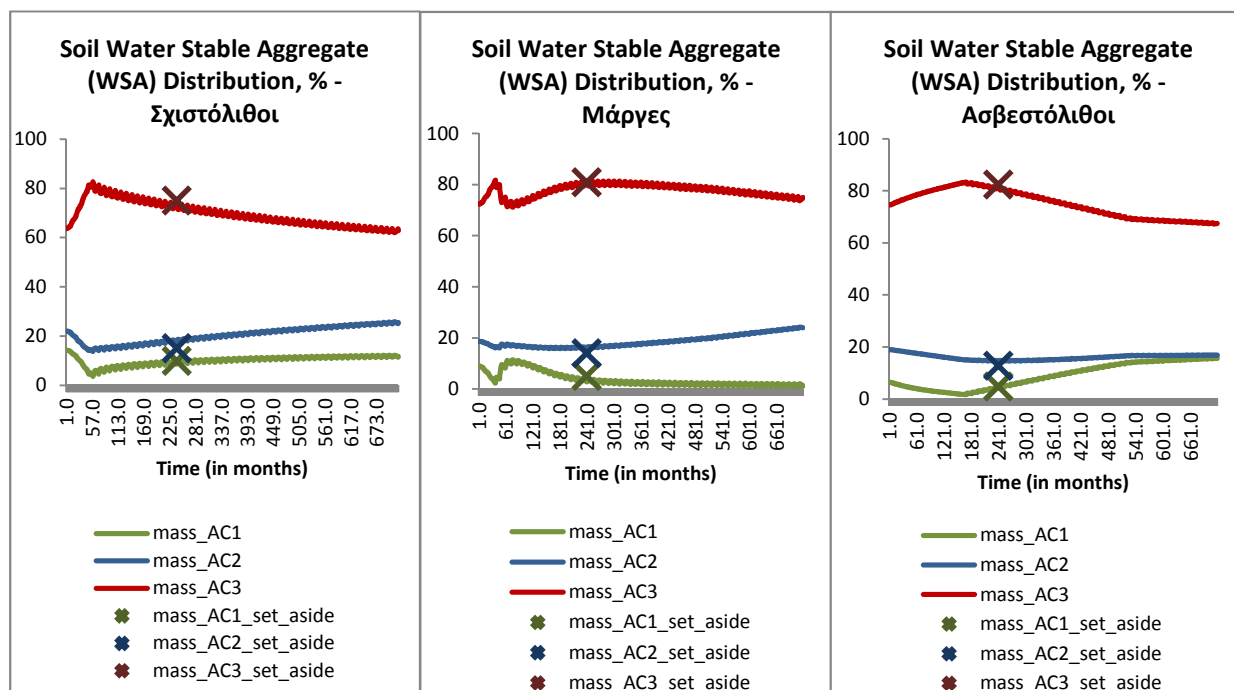
Παράλληλα κάθε περιοχή θα αξιολογηθεί ως προς την κατάσταση του εδάφους. Δείκτες λειτουργίας του εδάφους όπως ο λόγος SOM/(silt+clay) (Quiroga A, Funaro D, Noellemeyer E, 2006) οποίος πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 4,5 και ο εμπειρικός κανόνας για “εδάφη μεγάλης αγρονομικής αξίας” που προτείνει το κλάσμα των μακρο-συσσωματωμάτων ενός εδάφους να υπερβαίνει το 60% (Banwart S, Bernasconi SM, Bloem J, Blum W, Brandao M, 2011) θα χρησιμοποιηθούν για το χαρακτηρισμό των εδαφών.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο κεφαλαίο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την προσομοίωση των διαφορετικών περιοχών με το μοντέλο CAST

ΚΟΙΛΙΑΡΗΣ

Όπως αναφέρθηκε, στη λεκάνη απορροής του Κουιλάρη, προσομοιώθηκαν τρεις ομάδες σημείων. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης του μοντέλου φαίνονται στα ακόλουθα διαγράμματα.

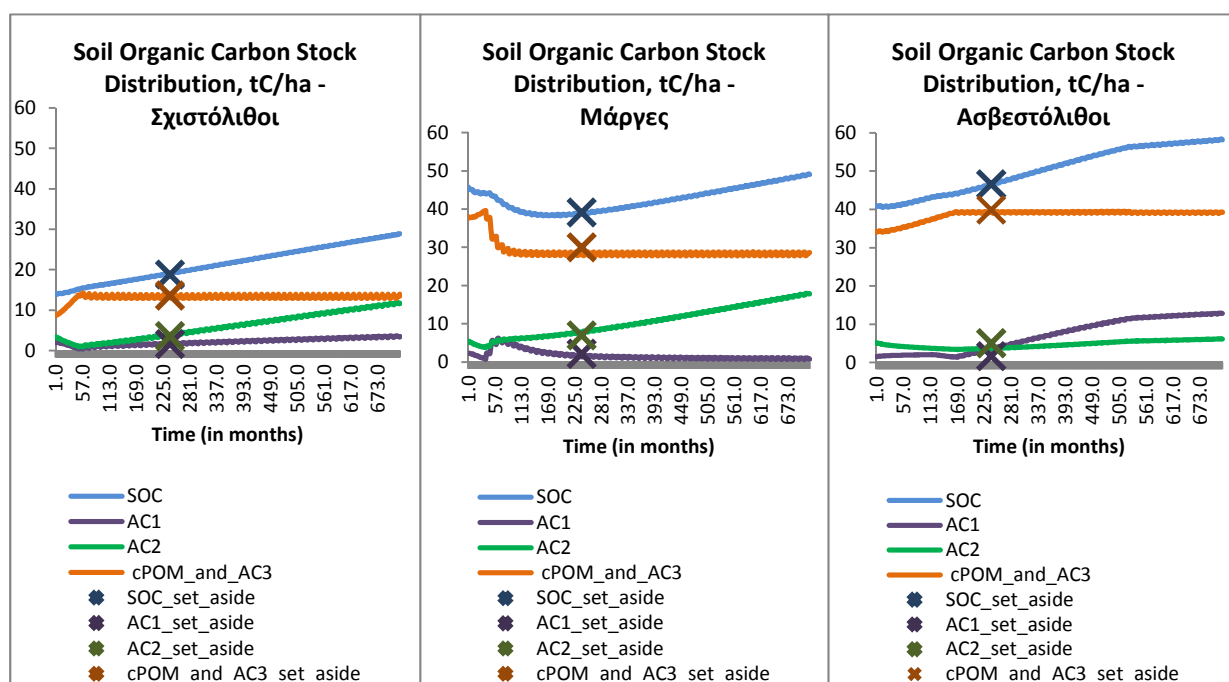


Σχήμα 5: Κατανομή υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων - Κουιλάρης

Στο Σχήμα 5 φαίνονται τα διαγράμματα της κατανομής των συσσωματωμάτων στα διάφορα κλάσματα. Το πρώτο διάγραμμα αφορά τους Σχιστόλιθους, το δεύτερο τις Μάργες και το τρίτο τους Ασβεστόλιθους. Εν γένει παρατηρείται μια κοινή κατανομή των συσσωματωμάτων στα εδάφη του Κουιλάρη. Τα μακρο-συσσωματώματα υπερτερούν έναντι των μικρο-συσσωματωμάτων και των συσσωματωμάτων αργίλου-ιλύος. Με την πάροδο του χρόνου τα μακρο-συσσωματώματα μειώνονται και αυξάνονται τα μικρότερα συσσωματώματα. Οι κύριες διαφορές παρατηρούνται στην κατανομή των συσσωματωμάτων AC2 και AC1. Στους Σχιστόλιθους και τις Μάργες παρατηρείται αύξηση των AC2 με το χρόνο ενώ στους Ασβεστόλιθους παραμένουν σταθερά. Όσον αφορά τα συσσωματώματα AC1, στους Σχιστόλιθους παραμένουν σταθερά, στις Μάργες μειώνονται σε οριακά μηδενικές τιμές, ενώ στους Ασβεστόλιθους αυξάνονται σε ίδιες τιμές με τα AC2.

Στα διαγράμματα που αφορούν τους Σχιστόλιθους και τις Μάργες παρατηρείται μια συμπεριφορά στην κατανομή των συσσωματωμάτων στους πρώτους μήνες, που δε συμφωνεί με τη μετέπειτα κατανομή τους. Για να ερμηνευθεί η συμπεριφορά αυτή του μοντέλου συνεχίστηκε η προσομοίωση για πολύ μεγάλο διάστημα, της τάξης των 500 ετών, προκειμένου να γίνει έλεγχος επανάληψης αυτού του φαινομένου. Η προσομοίωση έδειξε ότι το φαινόμενο αυτό δεν επαναλαμβάνεται, με αποτέλεσμα να αφορά μόνο τα πρώτα έτη της προσομοίωσης.

Ο χρόνος στον οποίο συμβαίνει αυτό το φαινόμενο είναι πολύ κοντά με το χρόνο παραμονής, όπως υπολογίζεται από τους ρυθμούς αποσύνθεσης. Το γεγονός ότι δεν είναι ίδιες οι τιμές οφείλεται είτε στο ότι το μοντέλο επιδέχεται καλύτερη βαθμονόμηση στους ρυθμούς αποσύνθεσης, είτε στο ότι αρχικά υπερέχουν κάποιοι ρυθμοί παραμονής έναντι κάποιων άλλων και στη συνέχεια έρχονται σε ισορροπία. Ορισμένοι παράγοντες δύναται να επηρεάζουν περισσότερο στα αρχικά στάδια μέχρι να ομαλοποιηθούν.



Σχήμα 6: Κατανομή οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα - Κουλιάρης

Στο Σχήμα 6 φαίνονται τα διαγράμματα για την κατανομή του οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα, για τους Σχιστόλιθους, τις Μάργες και τους Ασβεστόλιθους αντίστοιχα. Ο ΕΟΑ αυξάνεται σε κάθε περίπτωση στο τέλος της προσομοίωσης. Στους Σχιστόλιθους η αύξηση του ΕΟΑ είναι σταθερή και την πορεία του ακολουθεί ο άνθρακας στα AC2, με τον άνθρακα στα AC1 και AC3 να παραμένει σταθερός. Στις Μάργες ο ΕΟΑ τα πρώτα χρόνια μειώνεται αλλά στη συνέχεια ακολουθεί αυξητική πορεία, με τον άνθρακα στα AC2 να αυξάνεται, στα AC3 να παραμένει σταθερός και στα AC1 να μειώνεται σε οριακά μηδενικές τιμές. Στους Ασβεστόλιθους ο ΕΟΑ αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό και στη συνέχεια με μικρότερο. Την ίδια πορεία ακολουθεί ο άνθρακας στα AC1, με τον άνθρακα στα AC3 και AC2 να παραμένει σταθερός.

Όπως και στα διαγράμματα κατανομής των συσσωματωμάτων, έτσι και εδώ (Σχιστόλιθοι και Μάργες) παρατηρείται στους πρώτους μήνες της προσομοίωσης μια διαφορετική πορεία στις τιμές του άνθρακα στα συσσωματώματα, από αυτή που παρουσιάζουν στα υπόλοιπα χρόνια. Η πορεία των τιμών του άνθρακα ακολουθεί την πορεία της κατανομής των συσσωματωμάτων και οδηγεί στα συμπεράσματα που εξήχθησαν παραπάνω.

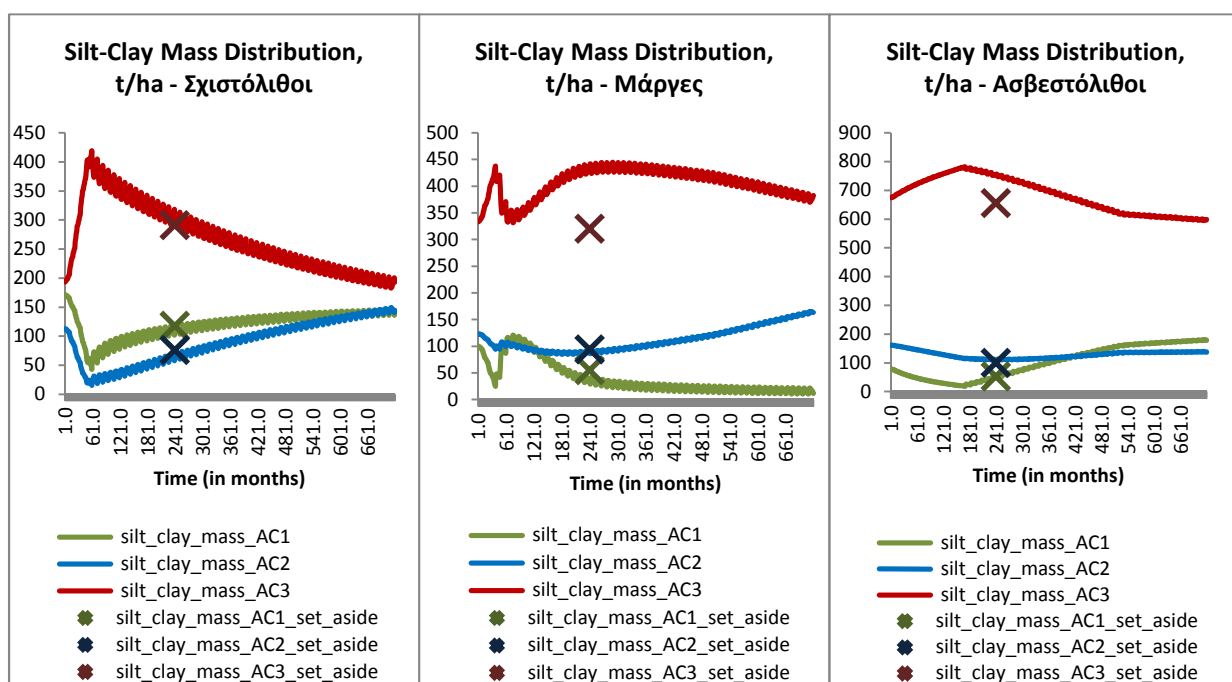
Οι διαφορές στις τιμές του άνθρακα μεταξύ των εδαφών οφείλονται στη διαφορετική τιμή της εισαγωγής άνθρακα από φυτικό υπόλειμμα. Αυτό που έχει σημασία είναι η αποθηκευτική

ικανότητα του εδάφους. Οι Σχιστόλιθοι και οι Ασβεστόλιθοι παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ετήσια αποθήκευση άνθρακα, ενώ στις Μάργες η αποθήκευση του άνθρακα είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη. Στον Πίνακα 4 φαίνονται οι ροές του άνθρακα για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 4: Ροές άνθρακα - Κουιάρης

	Ετήσιες τιμές ροών άνθρακα			
	Εισαγωγή (tn/ha per year)	Αποθήκευση (tn/ha per year)	CO ₂ (tn/ha per year)	Έκπλυση (tn/ha per year)
Σχιστόλιθοι	2.4000	0.2444	2.1515	0.0000
%		10.1839	89.6449	0.0000
Μάργες	3.7950	0.0489	3.4644	0.0000
%		1.2898	91.2886	0.0000
Ασβεστόλιθοι	3.7950	0.2866	3.3776	0.1251
%		7.5509	89.0024	3.2977

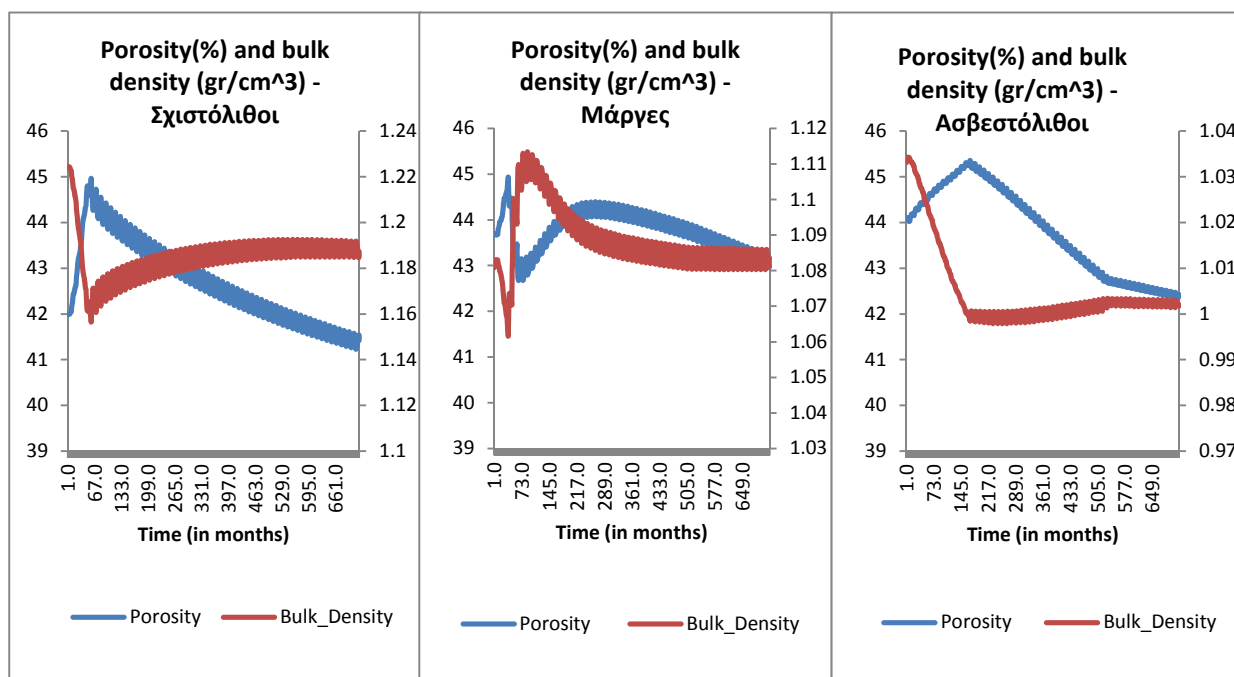
Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4, τη μεγαλύτερη αποθηκευτική ικανότητα παρουσιάζουν οι Σχιστόλιθοι. Ο άνθρακας που χάνεται από τις εκπομπές CO₂ είναι ο ίδιος, σε ποσοστιαία βάση, σε Σχιστόλιθους και Ασβεστόλιθους. Οι Ασβεστόλιθοι όμως παρουσιάζουν μικρότερη αποθήκευση άνθρακα σε σχέση με τους Σχιστόλιθους, καθώς υπάρχει σημαντικό ποσοστό έκπλυσης.



Σχήμα 7: Κατανομή αργίλου-ιλύος στα συσσωματώματα - Κουιάρης

Στο Σχήμα 7 φαίνονται τα διαγράμματα κατανομής αργίλου-ιλύος. Στους Σχιστόλιθους η μείωση της αργίλου στο AC3 ακολουθείται από αύξηση της αργίλου στα AC2 και AC1. Στις Μάργες η μείωση της αργίλου στα AC3 συνοδεύεται από αύξηση της αργίλου στα AC2 αλλά η αργίλος στα AC1 μειώνεται.

Στους Ασβεστόλιθους η μείωση της αργίλου στα AC3 συνοδεύεται από αύξηση της αργίλου στα AC1, ενώ η άργιλος στα AC2 παραμένει σταθερή.



Σχήμα 8: Πορώδες και φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους - Κοιλιάρης

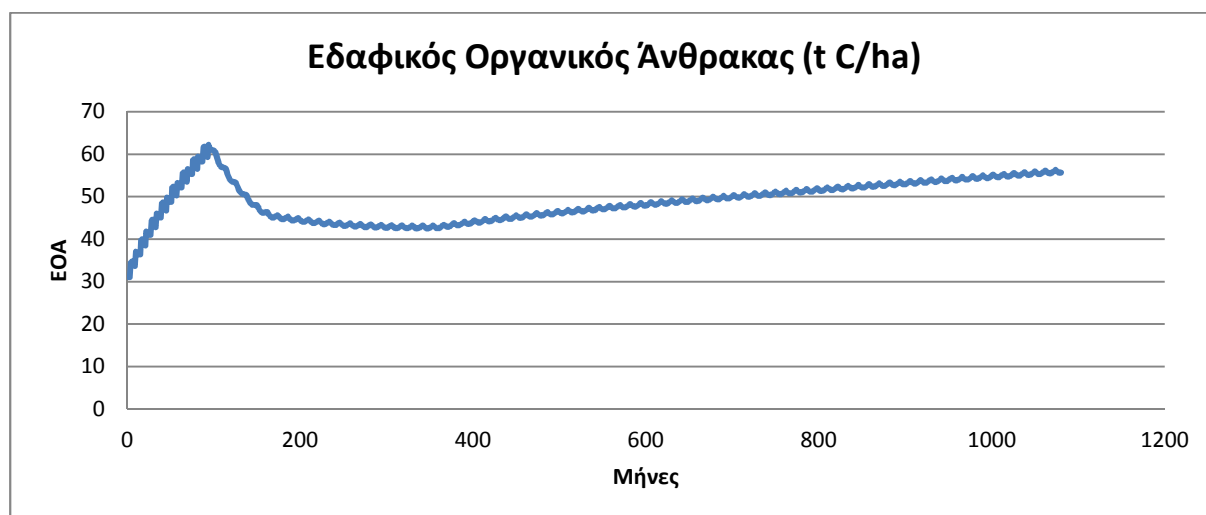
Στο Σχήμα 8 φαίνονται τα διαγράμματα του πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας των εδαφών του Κοιλιάρη. Στους Σχιστόλιθους παρατηρείται μείωση του πορώδους και αύξηση της πυκνότητας. Στις Μάργες το πορώδες αρχικά αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται, ενώ η πυκνότητα αρχικά μειώνεται έντονα και στη συνέχεια αποκτά σταθερή τιμή. Στους Ασβεστόλιθους το πορώδες αρχικά αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται, ενώ η πυκνότητα μειώνεται απότομα και στη συνέχεια παραμένει σταθερή.

ΜΗΛΙΑ

Όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση της Μηλιάς, η προσομοίωση που έχει γίνει αφορά την περίπτωση εισαγωγής εδαφοβελτιωτικού, οπότε και η προσομοίωση συνεχίστηκε για 60 χρόνια ώστε να επιτευχθούν ίδιες συνθήκες με τις υπόλοιπες περιοχές μελέτης.

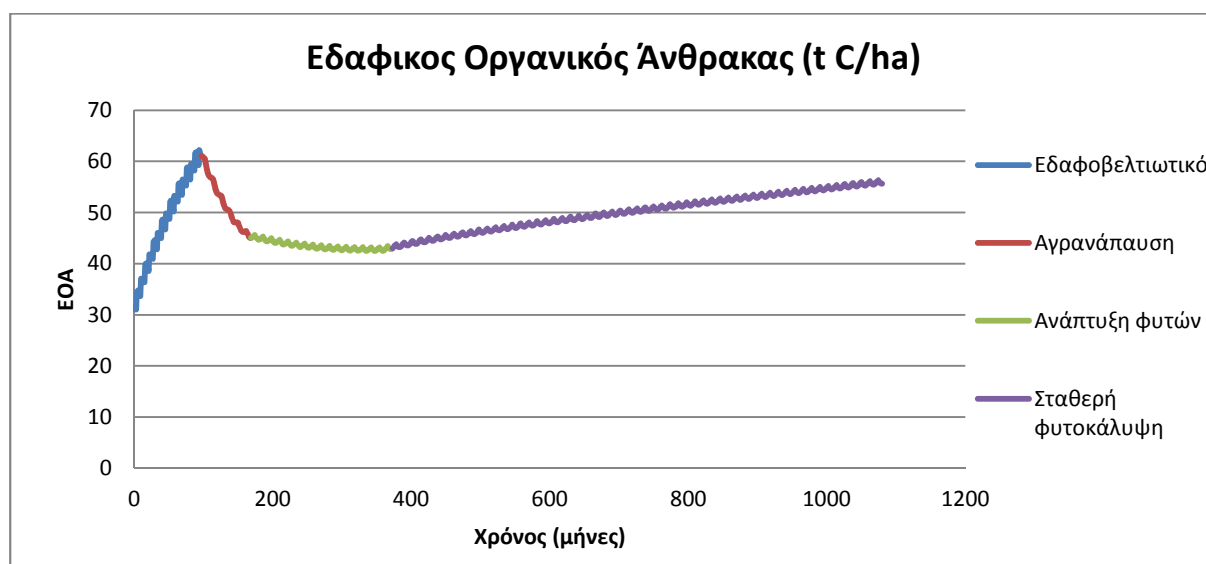
Ο υπολογισμών των ρών άνθρακα έγινε αρχικά για 4 περιόδους. Από 1 έως 8 χρόνια που γινόταν προσθήκη εδαφοβελτιωτικού, από 9 έως 10 χρόνια που το χωράφι βρισκόταν σε αγρανάπαυση, από 1 έως 10 χρόνια διότι εκείνη τη στιγμή έγινε η δειγματοληψία και από τον ενδέκατο έως τον εβδομηκοστό χρόνο για να έχουμε την προσομοίωση των 60 ετών για τη σύγκριση. Παρατηρείται ότι τα 8 χρόνια που γινόταν προσθήκη εδαφοβελτιωτικού, η ετήσια αποθήκευση του άνθρακα ήταν 2,94 τόνοι ανά εκτάριο. Τα επόμενα 2 χρόνια της αγρανάπαυσης παρατηρείται μείωση του άνθρακα κατά 27,5%. Συνολικά τα 10 χρόνια της πρώτης φάσης η ετήσια αποθήκευση άνθρακα στο έδαφος είναι 1,71 τόνοι ανά εκτάριο. Παράλληλα παρατηρείται ότι οι απώλειες άνθρακα μέσω των εκπομπών CO₂ είναι της τάξης 60 – 70 %. Τα επόμενα 60 χρόνια της προσομοίωσης η αποθήκευση άνθρακα μειώνεται με μέση ετήσια τιμή 0,016 τόνους ανά εκτάριο. Το ποσοστό απωλειών μέσω των εκπομπών CO₂ ανέρχεται στο 99%. Αυτό οφείλεται στο ότι μετά το 10^ο έτος και μέχρι το 30^ο, ο

οργανικός άνθρακας στο έδαφος συνεχίζει να μειώνεται. Για το λόγο αυτό η προσομοίωση για τη σύγκριση των 60 ετών θα αφορά τα έτη 31-90 όπου έχει επιτευχθεί η σταθερή φυτοκάλυψη και κατ' επέκταση η σταθερή εισροή φυτικού υπολείμματος στο έδαφος. Οι τιμές του εδαφικού οργανικού άνθρακα (SOC) για όλα τα χρόνια της προσομοίωσης, φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Διάγραμμα 3: Εδαφικός οργανικός άνθρακας - Μηλιά

Στο Διάγραμμα 3 φαίνονται τα 90 χρόνια προσομοίωσης. Από το 31^ο έως το 90^ο υπάρχει σταθερή φυτοκάλυψη οπότε παρατηρείται συνεχής αύξηση του εδαφικού οργανικού άνθρακα. Στο διάγραμμα παρατηρούμε 4 τάσεις των τιμών ροών του άνθρακα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης των 90 ετών οι οποίες φαίνονται καλύτερα παρακάτω.

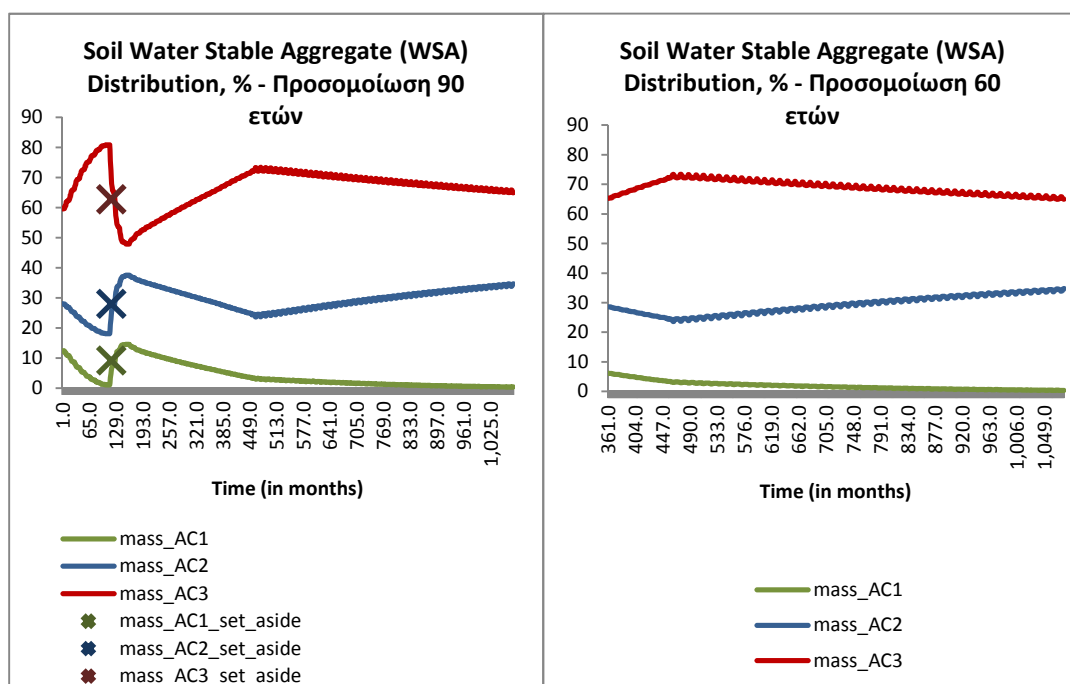


Διάγραμμα 4: Εδαφικός οργανικός άνθρακας διαφορετικών περιόδων - Μηλιά

Στο Διάγραμμα 4 φαίνεται η σημαντική αύξηση του ΕΟΑ μέχρι το 8^ο έτος λόγω της προσθήκης εδαφοβελτιωτικού, στη συνέχεια μέχρι το 14^ο έτος παρατηρείται απότομη μείωση του ΕΟΑ, η

μείωση συνεχίζεται πιο ομαλά μέχρι το 30^ο έτος, ενώ από εκεί μέχρι και το τέλος της προσομοίωσης παρατηρείται σταδιακή αύξηση του ΕΟΑ. Αυτή η καθυστέρηση παρατηρείται γιατί χρειάζεται χρόνος μετά το πέρας της καλλιέργειας για να επανέλθει η φυτοκάλυψη στο χωράφι και να γίνεται εισαγωγή άνθρακα από τη εισροή του φυτού στο έδαφος. Χαρακτηριστικά τα τελευταία 60 χρόνια της προσομοίωσης η ετήσια αποθήκευση άνθρακα στο έδαφος είναι 0,219 τόνοι ανά εκτάριο.

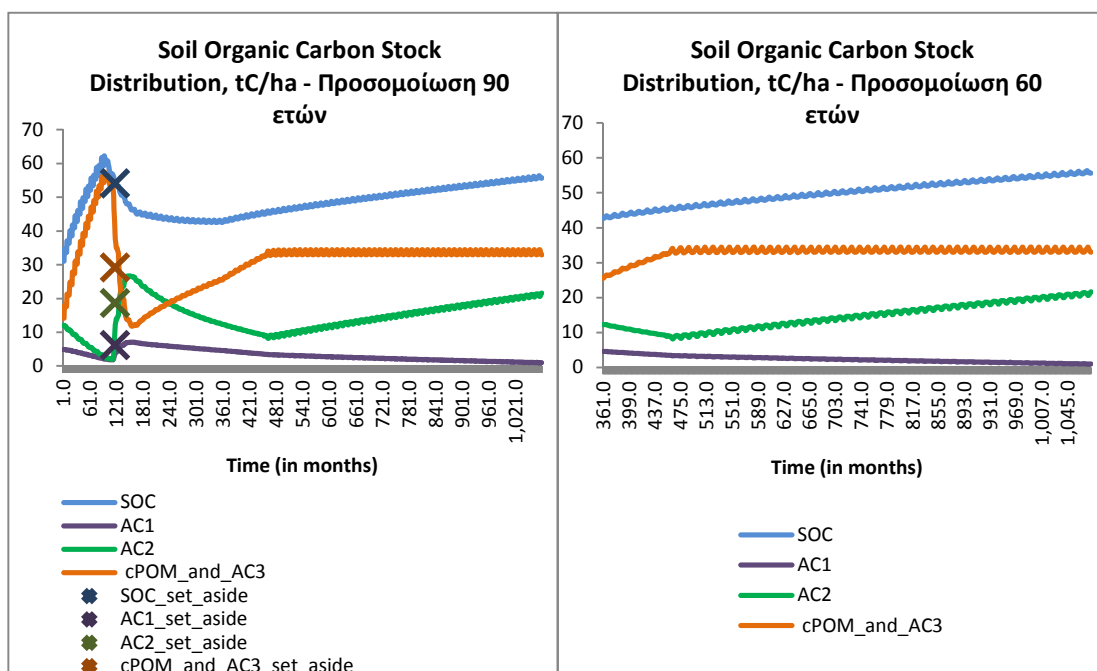
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η προσομοίωση της περίπτωσης της Μηλιάς για τα 90 χρόνια όπως έχει περιγραφεί ήδη και η προσομοίωση των 60 ετών που αφορά τη σύγκριση που θα γίνει.



Σχήμα 9: Κατανομή υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων - Μηλιά

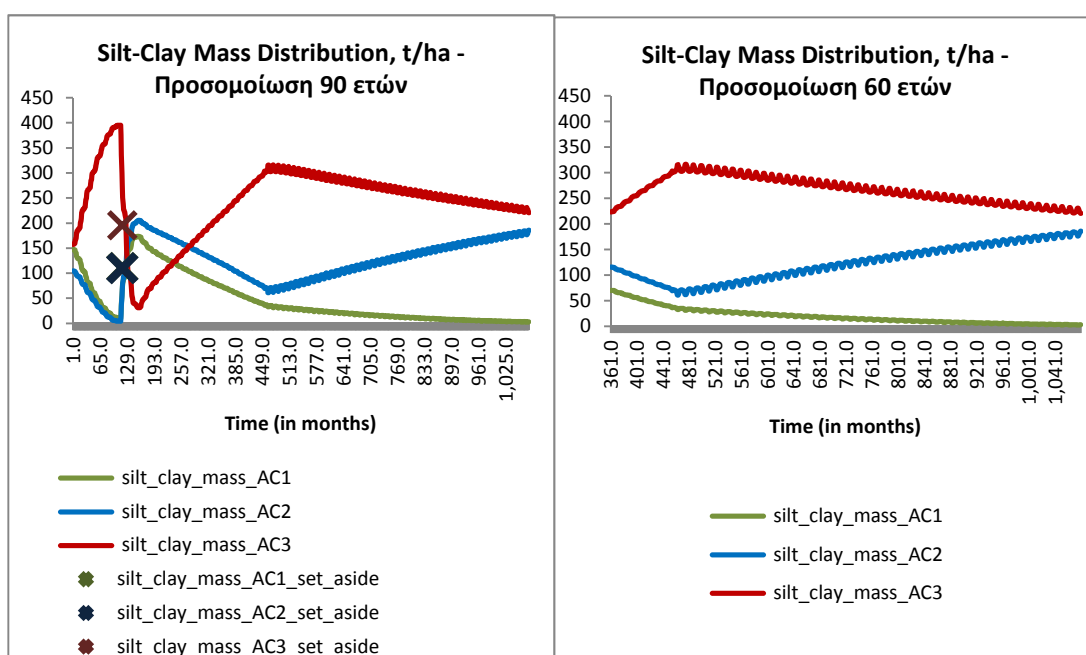
Στο Σχήμα 9 φαίνεται η κατανομή των συσσωματωμάτων για τα 90 και 60 χρόνια προσομοίωσης αντίστοιχα. Ο λόγος για τον οποίο παρατίθενται σχηματικά οι δυο αυτές περιπτώσεις είναι γιατί ενώ μελετάμε την περίπτωση προσομοίωσης των 60 ετών, είναι σημαντικό να φανεί η προσομοίωση και βαθμονόμηση του μοντέλου που πραγματοποιήθηκε τα πρώτα χρόνια κατά τα οποία εφαρμόστηκε το εδαφωβελτιωτικό. Οι διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στα πρώτα 30 χρόνια της προσομοίωσης των 90 ετών οφείλονται στην αρχική προσθήκη εδαφωβελτιωτικού και τη μετέπειτα αγρανάπαυση. Στην προσομοίωση των 60 ετών φαίνεται η κατανομή των υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων, με παρουσία κυρίως μακρο-συσσωματωμάτων, μικρο-συσσωματωμάτων και λιγότερο συσσωματωμάτων αργίλου-ιλύος. Τα μακρο-συσσωματώματα αρχικά αυξάνονται και στη συνέχεια μειώνονται με πολύ μικρό ρυθμό. Τα μικρο-συσσωματώματα αρχικά μειώνονται και στη συνέχεια αυξάνονται σταθερά, ενώ τα συσσωματώματα αργίλου-ιλύος μειώνονται σε οριακά μηδενικές τιμές. Αυτό σημαίνει ότι τα AC1 βρίσκονται κυρίως μέσα στα AC3 και AC2 συσσωματώματα και μάλιστα τα ελεύθερα AC1 και ένα μέρος των AC1 μέσα στα AC3

μεταφέρονται στα AC2. Τα μεγάλα συσσωματώματα στο έδαφος ενισχύουν την καλύτερη δομή του, ευνοώντας της εδαφικές λειτουργίες.



Σχήμα 10: Κατανομή οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα - Μηλιά

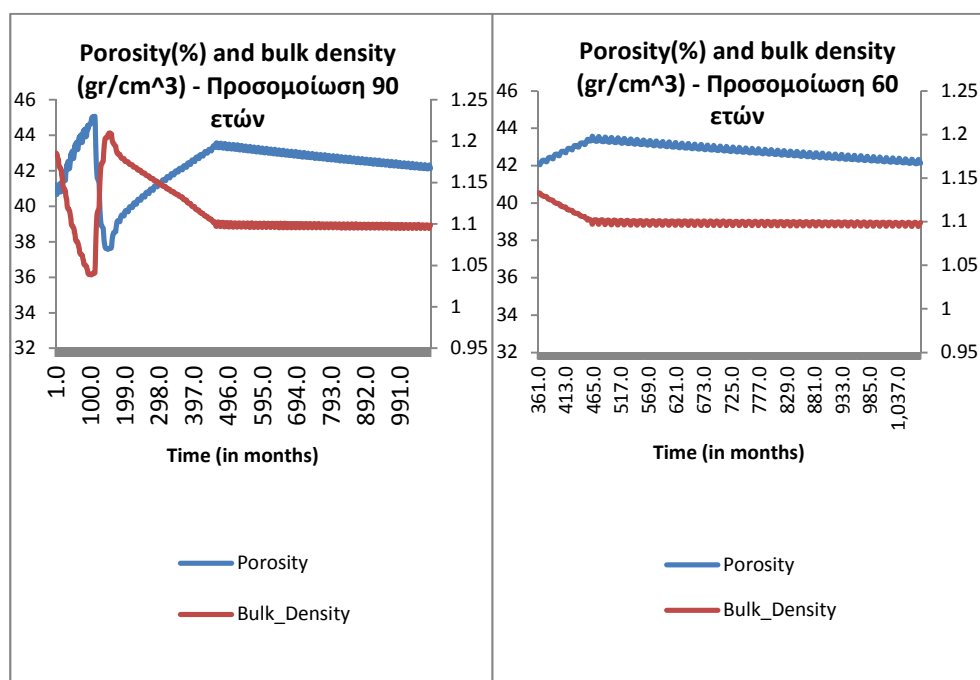
Στο Σχήμα 10 φαίνεται η κατανομή του οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα για τα 90 και 60 χρόνια προσομοίωσης αντίστοιχα. Περισσότερος άνθρακας παρατηρείται στα AC3 με σταθερή τιμή και ο λιγότερος στα AC1 όπου σταδιακά μειώνεται σε οριακά μηδενικές τιμές. Ο άνθρακας στα AC2 αυξάνεται οδηγώντας και σε αύξηση του ολικού ΕΟΑ. Αυτό έχει άμεση σχέση με την αύξηση των AC2 συσσωματωμάτων (Σχήμα 9).



Σχήμα 11: Κατανομή αργίλου-ιλύος στα συσσωματώματα - Μηλιά

Στο Σχήμα 11 φαίνεται η κατανομή αργίλου-ιλύος για τα 90 και 60 χρόνια προσομοίωσης αντίστοιχα. Παρατηρείται αύξηση της αργίλου στα συσσωματώματα AC2 και μείωση που τείνει σε οριακά μηδενικές τιμές στα AC1.

Γενικά στην περίπτωση της Μηλιάς φαίνεται ότι το σημαντικότερο ρόλο παίζουν τα μικρο-συσσωματώματα ενώ παρατηρείται οριακή απουσία των συσσωματωμάτων αργίλου-ιλύος σε βάθος χρόνου.



Σχήμα 12: Πορώδες και φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους - Μηλιά

Στο Σχήμα 12 φαίνονται τα διαγράμματα του πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας για τα 90 και 60 χρόνια προσομοίωσης αντίστοιχα. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνεται καθαρά η επίδραση του εδαφοβελτιωτικού στα πρώτα χρόνια της προσομοίωσης, καθώς το πορώδες αυξάνεται. Στο δεύτερο διάγραμμα φαίνεται μια σταθερή κατάσταση του εδάφους όπου το πορώδες και η φαινόμενη πυκνότητα παραμένουν σταθερά.

Πίνακας 5: Ροές άνθρακα - Μηλιά

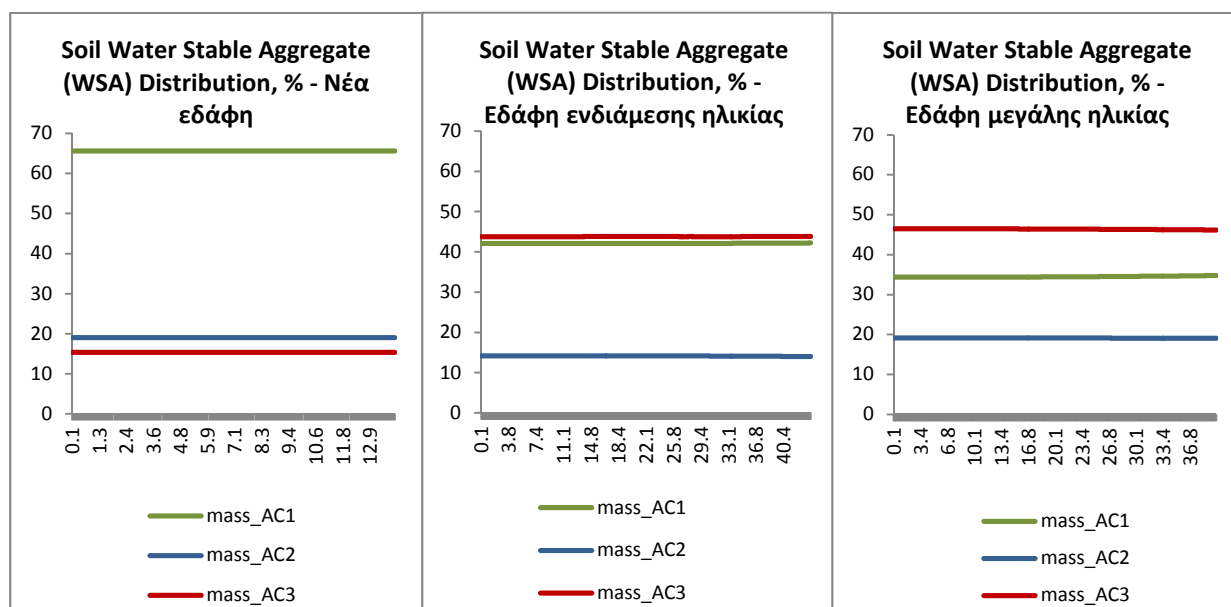
Έτη	Ετήσιες τιμές ροών άνθρακα (tn/ha)				
	Εισαγωγή	Αποθήκευση	CO2	Έκπλυση	
1 έως 8	8.0000	2.9430	4.7262	0.0000	εδαφοβελτιωτικό
%		36.7872	59.0778	0.0000	
9 έως 14	0.3833	-2.6999	3.0864	0.0000	χωρίς εδαφοβελτιωτικό
%		απώλειες			
15 έως 30	2.2400	-0.1702	2.3961	0.0000	
%		απώλειες			
31 έως 90	2.5000	0.2188	2.2782	0.0000	
%		8.7505	91.1296		

Στον Πίνακα 5 φαίνονται οι ροές του άνθρακα για όλα τα χρόνια της προσομοίωσης. Φαίνεται καθαρά η επίδραση της εφαρμογής εδαφοβελτιωτικού στην περιοχή καθώς αυξάνεται η αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους και μειώνονται οι εκπομπές CO₂. Στο διάστημα αγρανάπαυσης, το οποίο συνεπάγεται και παύση εφαρμογής εδαφοβελτιωτικού, η περιεκτικότητα του ΕΟΑ μειώνεται, όπως είναι αναμενόμενο. Στα τελευταία 60 χρόνια της προσομοίωσης με σταθερή φυτοκάλυψη, το έδαφος αρχίζει και πάλι να αποθηκεύει άνθρακα, με σαφώς μικρότερους ρυθμούς από ότι στην περίπτωση εδαφοβελτιωτικού, με τις εκπομπές CO₂ να αυξάνονται σημαντικά.

DAMMA GLACIER

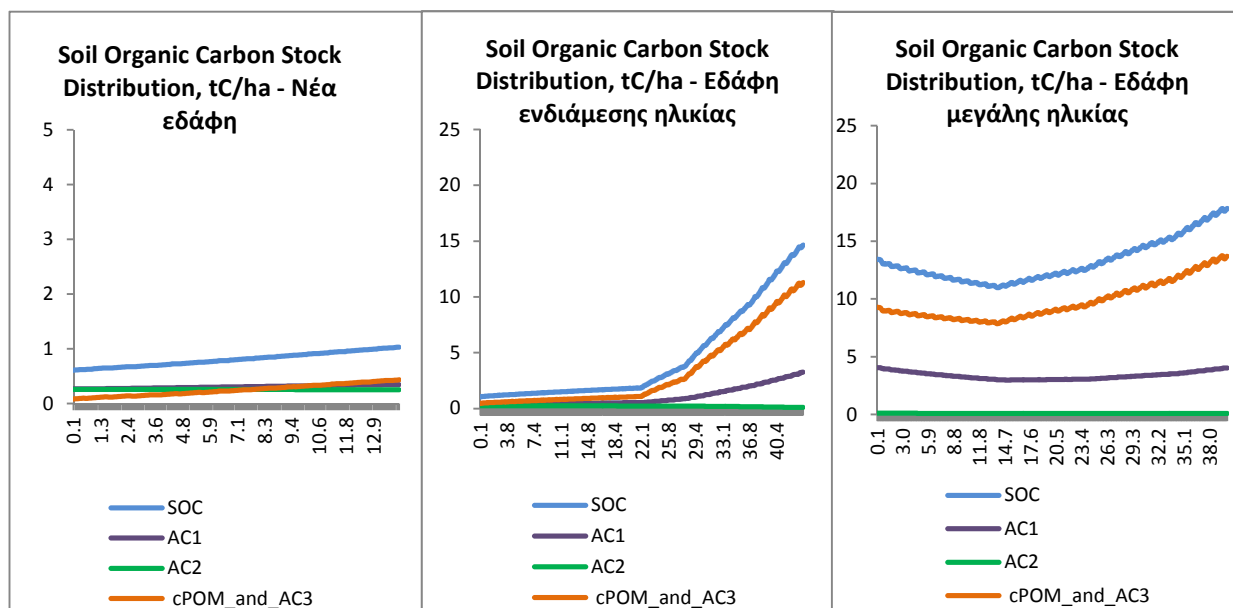
Όπως αναφέρθηκε, στην περίπτωση του Damma Glacier υπάρχει μια χρονοσειρά 136 ετών και έχουν προσομοιωθεί πέντε περίοδοι, καθώς ο παγετώνας ξαναμεγάλωσε δυο φορές στο διάστημα αυτό. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των νέων εδαφών, των εδαφών μέσης ηλικίας και των εδαφών μεγάλης ηλικίας.

Τα δεδομένα εισαγωγής και οι παράμετροι βαθμονόμησης του μοντέλου βρίσκονται στο Παράρτημα.



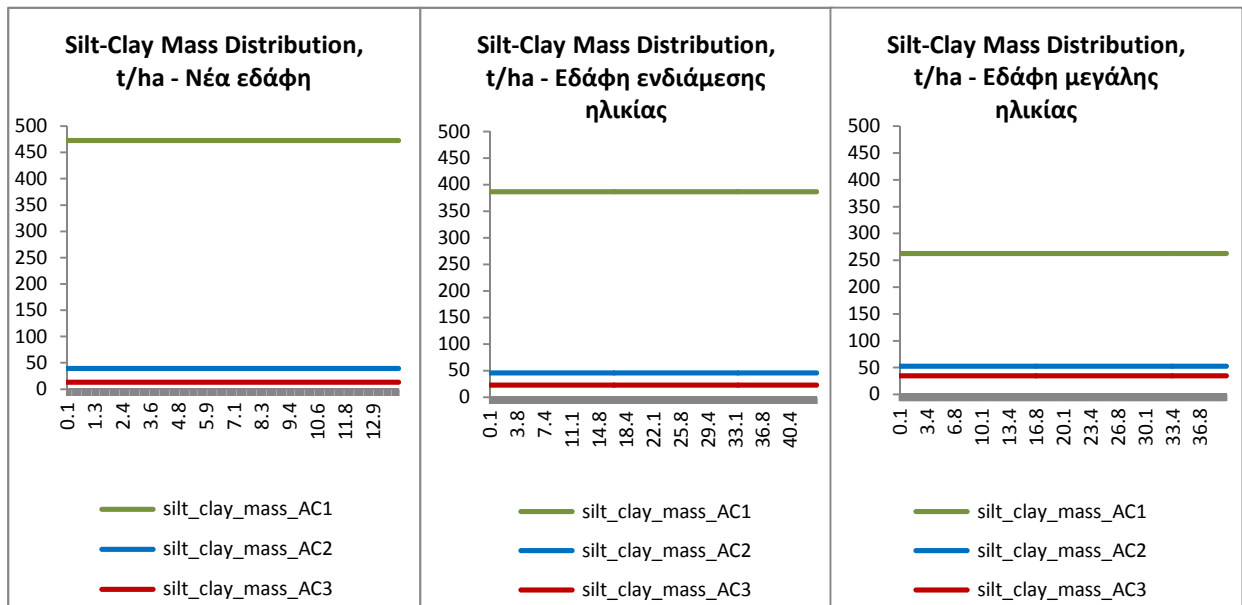
Σχήμα 13: Κατανομή υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων - Damma

Στο Σχήμα 13 φαίνονται τα διαγράμματα κατανομής συσσωματωμάτων για τις τρεις διαφορετικές ηλικίες εδαφών του Damma Glacier. Το πρώτο διάγραμμα αφορά τα νέα εδάφη, το δεύτερο τα μέσης ηλικίας εδάφη και το τρίτο τα μεγάλης ηλικίας εδάφη. Ουσιαστικά μπορούμε να δούμε την πορεία της κατανομής των συσσωματωμάτων στη χρονοσειρά του Damma. Στα νέα εδάφη υπερτερούν τα AC1 και στο βάθος της χρονοσειράς παρατηρείται μείωση των AC1 και αύξηση των AC3. Τα συσσωματώματα AC2 δε μεταβάλλονται ιδιαίτερα κατά μήκος της χρονοσειράς. Τα συσσωματώματα στην περιοχή αποτελούνται κυρίως από φυτικό υλικό στο οποίο προσκολλώνται σωματίδια άμμου.



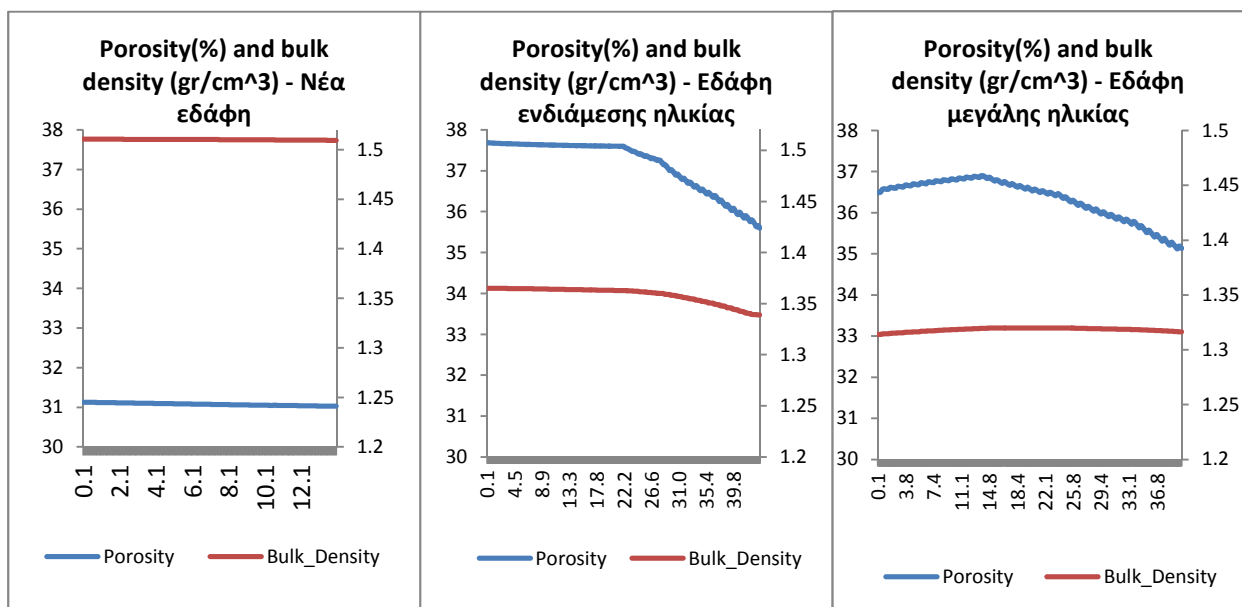
Σχήμα 14: Κατανομή οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα - Damma

Στο Σχήμα 14 φαίνονται τα διαγράμματα της κατανομής του οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα των εδαφών της χρονοσειράς του Damma. Στο διάγραμμα των νέων εδαφών ο άξονας της περιεκτικότητας άνθρακα έχει διαφορετική κλίμακα από τα διαγράμματα των εδαφών μέσης και μεγάλης ηλικίας, καθώς οι τιμές είναι πολύ χαμηλότερες και με τον τρόπο αυτό φαίνεται καλύτερα η αυξητική τάση του άνθρακα. Ο άνθρακας αυξάνεται κατά μήκος της χρονοσειράς κυρίως στα AC3 και AC1 συσσωματώματα. Στα συσσωματώματα AC2 ο άνθρακας παραμένει σταθερός σε πολύ χαμηλές τιμές. Στα νέα εδάφη ο κύκλος του άνθρακα ρυθμίζεται κυρίως από τη μικροβιακή δραστηριότητα μιας και δεν υπάρχει βλάστηση. Επίσης προϋπάρχει άνθρακας στα πετρώματα που εκτίθενται στην ατμόσφαιρα. Στα εδάφη μέσης και κυρίως μεγάλης ηλικίας, λόγω της σταδιακής ανάπτυξης της βλάστησης (θάμνοι και γρασίδι στα μέσης ηλικίας, ξυλώδη φυτά στα μεγάλης ηλικίας), αυξάνεται ο άνθρακας που εισέρχεται στο έδαφος.



Σχήμα 15: Κατανομή αργίλου-ιλύος στα συσσωματώματα - Damma

Στο Σχήμα 15 φαίνεται η κατανομή αργίλου-ιλύος στα συσσωματώματα στο βάθος της χρονοσειράς. Παρατηρείται μείωση στα AC1 καθώς μεγαλώνει η ηλικία του εδάφους ενώ στα AC2 και AC3 αυξάνεται ελαφρώς, διατηρώντας πάντα πού χαμηλές τιμές. Αυτό είναι ένδειξη διάβρωσης του εδάφους, καθώς λόγω της διάβρωσης απομακρύνονται τα μικρά και ελαφρά σωματίδια του εδάφους όπως η άργιλος.



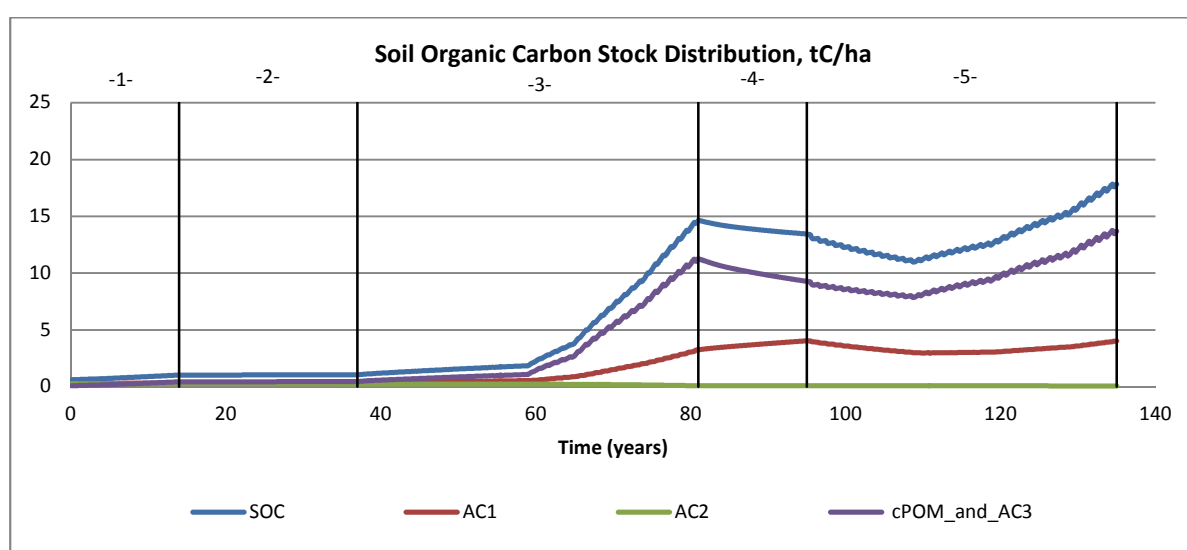
Σχήμα 16: Πορώδες και φαινόμενη πυκνότητα του εδάφους - Damma

Στο Σχήμα 16 φαίνονται τα διαγράμματα του πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας στο βάθος της χρονοσειράς. Παρατηρείται αύξηση του πορώδους και μείωση της φαινόμενης πυκνότητας του

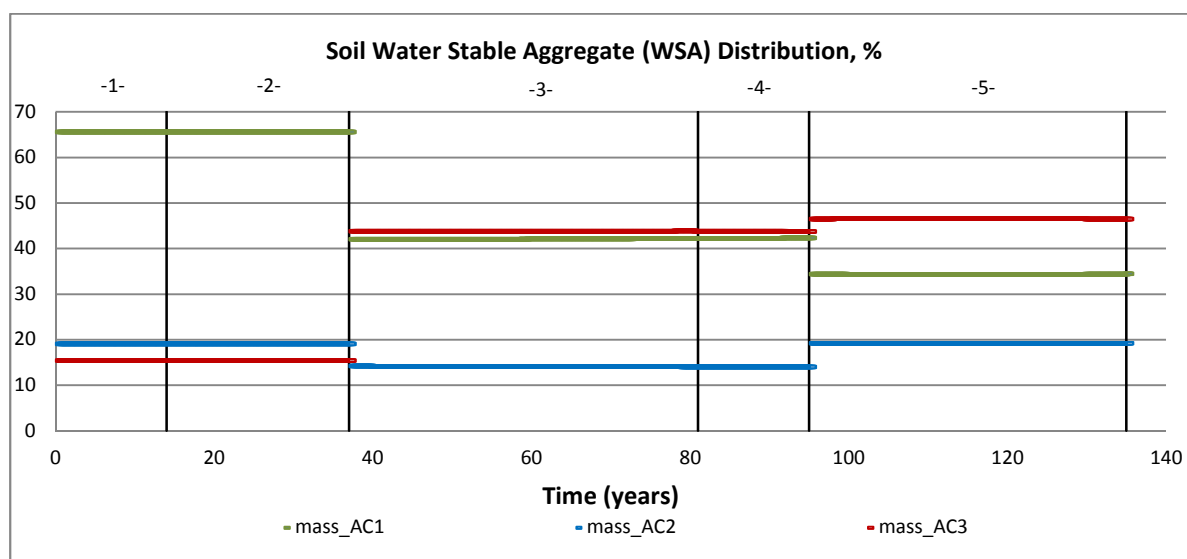
εδάφους καθώς μεγαλώνει η ηλικία του, λόγω της επίδρασης της σταδιακής φυτοκάλυψης στη δομή του.

Όπως προαναφέρθηκε για την περίπτωση του Damma βαθμονομήθηκαν πέντε περίοδοι. Στα παραπάνω Σχήματα παρατέθηκαν τα αποτελέσματα για τις περιόδους 1, 3 και 5 που αφορούσαν τα εδάφη μικρής, ενδιάμεσης και μεγάλης ηλικίας. Μεταξύ αυτών μεσολαβούν οι περίοδοι 2 και 4 που αφορούν τις δυο επαναπροωθήσεις του παγετώνα. Στις περιόδους αυτές το έδαφος διαβρώθηκε εξαιτίας του παγετώνα. Τα διαγράμματα που εξήχθησαν από το μοντέλο μετά τη βαθμονόμηση των επαναπροωθήσεων του παγετώνα βρίσκονται στο Παράρτημα.

Στα διαγράμματα παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα για τον εδαφικό άνθρακα και τα συσσωματώματα σε όλο το μήκος της χρονοσειράς, περιλαμβάνοντας και τις περιόδους επαναπροώθησης του παγετώνα.



Διάγραμμα 5: Κατανομή οργανικού άνθρακα στα συσσωματώματα στη χρονοσειρά του Damma



Διάγραμμα 6: Κατανομή υδατο-σταθερών συσσωματωμάτων στη χρονοσειρά του Damma

Αυτό που παρατηρείται είναι ότι καθώς το έδαφος μεγαλώνει, τα μικρά συσσωματώματα (<53μm) ενώνονται με σωματιδιακό οργανικό υλικό και σχηματίζουν μεγαλύτερα συσσωματώματα.

Πίνακας 6: Ροές άνθρακα στη χρονοσειρά του Damma

Έτη	Ετήσιες τιμές ροών άνθρακα (tn/ha)			
	Εισαγωγή	Αποθήκευση	CO ₂	Έκπλυση
1. 14 έτη (νέα εδάφη)	0.0730	0.0304	0.0363	0.0000
%		41.6145	49.6869	0.0000
2. 23 έτη (προώθηση του παγετώνα)	0.0000	0.0032	0.0028	0.0000
3. 44 έτη (μέσης ηλικίας εδάφη)	0.7162	0.3090	0.4023	0.0000
%		43.1405	56.1725	0.0000
4. 14 έτη (προώθηση του παγετώνα)	0.2000	-0.0981	0.2943	0.0000
5. 40 έτη (μεγάλης ηλικίας εδάφη)	1.1175	0.1082	0.9152	0.0000
%		9.6801	81.8982	0.0000

Παρατηρούμε ότι όσο απομακρυνόμαστε από τον παγετώνα προς τα εδάφη μεγάλης ηλικίας, αυξάνονται οι εκπομπές CO₂. Αυτό οφείλεται στη συσσώρευση άνθρακα στη φυτική βιομάζα και το έδαφος όπου ουσιαστικά φανερώνουν μια ταχεία αναπνευστική δραστηριότητα με την περαιτέρω ανάπτυξη του οικοσυστήματος. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με μελέτες σε αρκτικά οικοσυστήματα, όπου τα ποσοστά εκροής CO₂ αυξάνονται με το χρόνο από την απόψυξη (Guelland et al., 2012).

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Λεκάνη απορροής Κουλιάρη

Η προσομοίωση των διαφορετικών σημείων στη λεκάνη απορροής του Κουλιάρη έδειξε μια ομοιομορφία στις παραμέτρους βαθμονόμησης. Υπάρχουν όμως ορισμένες διαφορές οι οποίες βοηθούν στην εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων για τα διαφορετικά εδάφη. Όλες οι παράμετροι βαθμονόμησης κάθε προσομοίωσης βρίσκονται στο Παράρτημα. Στους ακόλουθους πίνακες φαίνονται οι παράμετροι βαθμονόμησης κάθε σημείου, που παρουσιάζουν τις σημαντικότερες διαφορές.

Πίνακας 7: Σύγκριση ρυθμών αποσύνθεσης - Κουλιάρης

		Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι
	RATE CONSTANTS (1/γ)			
	Microaggregation			
	k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.8000	0.2000	0.2000
	k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.8000	0.2000	0.0200
	Decomposition			
fresh plant input	DPM	30.0000	15.0000	10.4500
	RPM	0.3050	1.0000	5.5000

	RPMc	1.0000	1.0000	5.5000
	RPMf	0.3050	0.0305	5.5000
AC3 Aggregate Type	DPMc within AC2	2.0000	3.0000	3.0000
AC1 Aggregate Type	HUM(AC1)	0.0051	0.5000	0.0051

Οι σταθερές ρυθμού του Πίνακα 7 δείχνουν μεγαλύτερη μικρο-συσσωμάτωση και μεγαλύτερο ρυθμό διάσπασης του εύκολα αποσυντιθέμενου φυτικού υλικού που εισέρχεται στο έδαφος, στους Σχιστόλιθους. Αντίθετα οι Ασβεστόλιθοι παρουσιάζουν μικρότερη μικρο-συσσωμάτωση και μεγαλύτερη διάσπαση του ανθεκτικού φυτικού υλικού που εισέρχεται στο έδαφος. Στις Μάργες παρατηρείται μεγάλος ρυθμός αποσύνθεσης της δεξαμενής του HUM στο κλάσμα του AC1.

Πίνακας 8: Σύγκριση μακρο-συσσωμάτωσης - Κοιλιάρης

	Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι
Proportional contribution of the components in aggregation			
Macroaggregation			
RPMc	0.1500	0.2000	0.1000
DPMc	0.1500	0.2000	0.2000
AC1	0.4500	0.5000	0.6500
AC2	0.2500	0.1000	0.0500

Στον Πίνακα 8 φαίνεται η συνεισφορά των συστατικών στη μακρο-συσσωμάτωση. Σε όλες τις περιπτώσεις κυρίαρχο ρόλο στη μακρο-συσσωμάτωση παίζει το AC1. Στους Σχιστόλιθους τα μακρο-συσσωματώματα προκύπτουν από το AC1 με το φυτικό υλικό με σημαντική συνεισφορά του AC2, ενώ στις Μάργες και περισσότερο στους Ασβεστόλιθους, τα μακρο-συσσωματώματα δημιουργούνται κυρίως από το AC1 με το φυτικό υλικό.

Πίνακας 9: Σύγκριση σταθερών διάσπασης μακρο-συσσωματωμάτων - Κοιλιάρης

	Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι
Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable	0.00200	0.00180	0.00150
Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00200	0.00180	0.00150

Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00200	0.00180	0.00150
---	---------	---------	---------

Στον Πίνακα 9 φαίνονται οι τιμές διάσπασης των μακρο-συσσωματωμάτων. Ουσιαστικά είναι το ποσοστό του λεπτού και αδρού εύκολα αποσυντιθέμενου φυτικού υλικού που βρίσκεται στο κλάσμα των AC3, στο κλάσμα των AC2 μέσα στο AC3 και στο κλάσμα των AC2, κάτω από το οποίο τα μακρο-συσσωματώματα θεωρούνται ασταθή και σπάνε. Αυτό που προκύπτει είναι ότι τα μακρο-συσσωματώματα σπάνε πιο εύκολα στους Σχιστόλιθους και λιγότερο στους Ασβεστόλιθους.

Κοιλιάρης – Μηλιά

Για τη σύγκριση της περιοχής του Κοιλιάρη με την περιοχή της Μηλιάς, θα χρησιμοποιηθούν οι παράμετροι που παρουσίασαν τις σημαντικότερες διαφορές.

Πίνακας 10: Σύγκριση σταθερών ρυθμού - Κοιλιάρης-Μηλιά

	Κοιλιάρης			Μηλιά
	Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι	
RATE CONSTANTS (1/γ)				
Fragmentation				
RPM to RPMc	15.0000	15.0000	15.0000	50.0000
Macroaggregation				
RPMc	0.6000	0.6000	0.6000	1.2000
DPMc	0.4700	0.4700	0.4700	0.8000
Microaggregation				
k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.8000	0.2000	0.2000	2.0000
k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.8000	0.2000	0.0200	2.0000

Στον Πίνακα 10 φαίνονται οι σταθερές ρυθμού του Κοιλιάρη και της Μηλιάς. Παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην τιμή του θρυμματισμού του ανθεκτικού φυτικού υλικού σε αδρό φυτικό υλικό. Στην περιοχή της Μηλιάς είναι μεγαλύτερος ο ρυθμός θρυμματισμού, κάτι που υποδηλώνει μεγαλύτερη δράση γαιοσκωλήκων και λοιπής πανίδας. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερος ρυθμός μακρο-συσσωμάτωσης στη Μηλιά, ενώ ο ρυθμός μικρο-συσσωμάτωσης είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερος από αυτόν του Κοιλιάρη.

Πίνακας 11: Σύγκριση ρυθμών αποσύνθεσης - Κοιλιάρης-Μηλιά

		Κοιλιάρης			Μηλιά
		Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι	
fresh plant input	DPM	30.0000	15.0000	10.4500	0.4000
	RPM	0.3050	1.0000	5.5000	0.1000
	RPMc	1.0000	1.0000	5.5000	0.1000
	RPMf	0.3050	0.0305	5.5000	0.1000

AC3 Aggregate Type	RPMc within AC3	0.1500	0.1500	0.1500	0.1000
	RPMf within AC3	0.1500	0.1500	0.1500	0.1000
	DPMc within AC3	2.0000	3.0000	3.0000	0.5000
	DPMf within AC3	1.5000	1.5000	1.5000	0.5000
	BIO(AC1) within AC3	0.6000	0.6000	0.6000	0.0600
	HUM(AC1) within AC3	0.0031	0.0031	0.0031	0.0030
	BIO(AC2) within AC3	0.6000	0.6000	0.6000	0.0600
	HUM(AC2) within AC3	0.0021	0.0021	0.0021	0.0020
	RPMf(AC2) within AC3	0.1069	0.1069	0.1069	0.1000
	DPMf(AC2) within AC3	1.5000	1.5000	1.5000	0.1000
AC2 Aggregate Type	BIO(AC2)	0.6000	0.6000	0.6000	0.0600
	HUM(AC2)	0.0051	0.0051	0.0051	0.0020
	RPMf(AC2)	0.2069	0.2069	0.2069	0.1000
	DPMf(AC2)	1.5000	1.5000	1.5000	0.1000
AC1 Aggregate Type	BIO(AC1)	0.6000	0.6000	0.6000	0.0600
	HUM(AC1)	0.0051	0.5000	0.0051	0.0020

Στον Πίνακα 11 φαίνονται οι ρυθμοί αποσύνθεσης για τις δυο περιοχές. Εν γένει οι ρυθμοί αποσύνθεσης είναι μικρότεροι στην περιοχή της Μηλιάς. Ο ρυθμός αποσύνθεσης του φρέσκου φυτικού υλικού στη Μηλιά είναι περίπου δυο τάξεις μεγέθους μικρότερος από αυτόν του Κοιλιάρη. Αυτό σημαίνει ότι το εύκολα αποσυντιθέμενο φυτικό υλικό διασπάται αργά. Αυτό οφείλεται στις πρακτικές διαχείρισης που εφαρμόστηκαν στην περιοχή, όπως η χρήση εδαφοβελτιωτικών και η αγρανάπαυση, οδηγώντας σε μείωση των ρυθμών αποσύνθεσης και αύξηση του ΕΟΑ.

Πίνακας 12: Σύγκριση μακρο και μικρο συσσωμάτωσης - Κοιλιάρης-Μηλιά

	Κοιλιάρης			Μηλιά
	Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι	
Proportional contribution of the components in aggregation				
Macroaggregation				
RPMc	0.1500	0.2000	0.1000	0.4500
DPMc	0.1500	0.2000	0.2000	0.3800
AC1	0.4500	0.5000	0.6500	0.0700
AC2	0.2500	0.1000	0.0500	0.1000
Microaggregation				
RPMf within AC3	0.2340	0.2340	0.2340	0.8000
DPMf within AC3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
AC1 within AC3	0.7660	0.7660	0.7660	0.2000

Στον Πίνακα 12 φαίνεται η συνεισφορά των συστατικών στη συσσωμάτωση. Σε αντίθεση με τον Κοιλιάρη, τα μακρο-συσσωματώματα στην περιοχή της Μηλιάς προκύπτουν κυρίως από το φυτικό υλικό και πολύ λιγότερο από το AC1 και AC2. Αυτό οφείλεται στο αμμώδες έδαφος της Μηλιάς, όπου τα συσσωματώματα δημιουργούνται γύρω από το εισερχόμενο φυτικό υλικό. Μεγάλη διαφορά παρατηρείται και στη μικρο-συσσωμάτωση, καθώς στον Κοιλιάρη τα μικρο-συσσωματώματα δημιουργούνται κυρίως από το AC1 στο AC3, ενώ στη Μηλιά από το λεπτό ανθεκτικό φυτικό υλικό στα AC3.

Πίνακας 13: Σύγκριση σταθερών διάσπασης μακρο-συσσωματωμάτων - Κοιλιάρης-Μηλιά

	Κοιλιάρης			Μηλιά
	Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι	
Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable	0.00200	0.00180	0.00150	0.018
Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00200	0.00180	0.00150	0.018
Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00200	0.00180	0.00150	0.018

Στον Πίνακα 13 φαίνονται οι τιμές διάσπασης των μακρο-συσσωματωμάτων. Παρατηρείται ότι στη Μηλιά τα μακρο-συσσωματώματα είναι πιο ασταθή, με αποτέλεσμα να σπάνε πιο εύκολα.

Οι διαφορές ανάμεσα στα εδάφη του Κοιλιάρη και τα εδάφη της Μηλιάς, παρόλο που σαν εδάφη χαρακτηρίζονται από διάβρωση και υποβάθμιση, οφείλονται στις διαφορετικές πρακτικές διαχείρισης που έχουν εφαρμοστεί στη Μηλιά. Ουσιαστικά παρατηρείται η μεγάλη σημασία των πρακτικών διαχείρισης (εδαφοβελτιωτικά, αγρανάπαυση μεταξύ καλλιεργειών) στη μελλοντική συμπεριφορά του εδάφους.

Χρονοσειρά Damma

Η προσομοίωση των διαφορετικής ηλικίας εδαφών στη χρονοσειρά του Damma έδειξε σημαντικές διαφορές στις παραμέτρους βαθμονόμησης που αφορούν την αποσύνθεση του φρέσκου φυτικού υπολείμματος που εισέρχεται στο έδαφος και αυτό γιατί η βλάστηση αναπτύσσεται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τον παγετώνα. Οι ρυθμοί αποσύνθεσης και διάσπασης των συσσωματωμάτων δεν παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές στα εδάφη διαφορετικής ηλικίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα εδάφη μεγάλης ηλικίας του Damma παραμένουν νέα σε σχέση με τα εδάφη του Κοιλιάρη.

Πίνακας 14: Σύγκριση σταθερών θρυμματισμού φυτικού υλικού - Damma

	Νέα εδάφη	Εδάφη μέσης ηλικίας	Εδάφη μεγάλης ηλικίας
RATE CONSTANTS (1/y)			
Fragmentation			
RPM to RPMc	1.0000	20.0000	14.0000
RPMc to RPMf	0.0001	0.0010	0.0010
RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.0100	0.1000	0.1000
DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.0100	0.5000	0.5000

Στον Πίνακα 14 φαίνονται οι τιμές θρυμματισμού του φυτικού υλικού για τις διαφορετικές ηλικίες εδαφών στο Damma. Παρατηρείται αυξημένος ρυθμός θρυμματισμού στα εδάφη μεγαλύτερης ηλικίας σε σχέση με τα νέα, λόγω της ανάπτυξης φυτών σε αυτά καθώς και της ύπαρξης πανίδας.

Πίνακας 15: Σύγκριση ρυθμών αποσύνθεσης φυτικού υλικού - Damma

		Νέα εδάφη	Εδάφη μέσης ηλικίας	Εδάφη μεγάλης ηλικίας
	Decomposition			
fresh plant input	DPM	3.0000	7.0000	10.0000
	RPM	0.0050	0.1000	0.2000
	RPMc	0.0100	0.1000	0.2000
	RPMf	0.0100	0.1000	0.2000

Στον Πίνακα 15 φαίνεται ότι στα εδάφη μεγαλύτερης ηλικίας οι ρυθμοί αποσύνθεσης του φρέσκου φυτικού υλικού που εισέρχεται στο έδαφος είναι μεγαλύτεροι, από ότι στα νέα εδάφη. Αυτό οφείλεται τόσο στην ανάπτυξη της βλάστησης στο βάθος της χρονοσειράς αλλά και στο είδος της βλάστησης στα εδάφη διαφορετικής ηλικίας. Τα νέα εδάφη καλύπτονται από αραιή βλάστηση, τα μέσης ηλικίας από γρασίδι και θάμνους, ενώ τα μεγάλης ηλικίας από ξυλώδη φυτά.

Ουσιαστικά οι διαφορές που παρατηρούνται στη χρονοσειρά του Damma έχουν να κάνουν κυρίως με την ανάπτυξη της βλάστησης στο έδαφος, από τη στιγμή που αυτό εκτίθεται στο περιβάλλον, καθώς υποχωρεί ο παγετώνας, μέχρι την ηλικία των 135 ετών. Σε κάθε περίπτωση όμως οι ρυθμοί αποσύνθεσης και διάσπασης είναι πολύ μικροί.

Κοιλιάρης - Damma

Για τη σύγκριση των περιοχών του Κοιλιάρη με τη χρονοσειρά του Damma, επιλέχθηκαν τα εδάφη μεγάλης ηλικίας του παγετώνα λόγω της ανάπτυξης του οικοσυστήματος στο πέρασμα του χρόνου καθώς ο παγετώνας υποχωρεί.

Πίνακας 16: Σύγκριση σταθερών ρυθμού - Κοιλιάρης-Damma

	Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι	Εδάφη μεγάλης ηλικίας
RATE CONSTANTS (1/y)				
Fragmentation				
RPM to RPMc	15.0000	15.0000	15.0000	14.0000
RPMc to RPMf	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010
RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.0800	0.1000	0.1000	0.1000
DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.5000	0.5000	1.0000	0.5000
Macroaggregation				
RPMc	0.6000	0.6000	0.6000	0.1000
DPMc	0.4700	0.4700	0.4700	0.5000
Microaggregation				
k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.8000	0.2000	0.2000	0.2000
k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.8000	0.2000	0.0200	0.2000

Στον Πίνακα 16 φαίνεται ότι τα εδάφη μεγάλης ηλικίας του Damma παρουσιάζουν παρόμοιους ρυθμούς θρυμματισμού και μικρο-συσσωμάτωσης με τα εδάφη του Κοιλιάρη. Η μόνη διαφορά είναι ότι η μακρο-συσσωμάτωση στα εδάφη του Damma είναι μικρότερη λόγω του ανθεκτικού φυτικού υλικού.

Πίνακας 17: Σύγκριση ρυθμών αποσύνθεσης - Κοιλιάρης-Damma

		Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι	Εδάφη μεγάλης ηλικίας
	Decomposition				
fresh plant input	DPM	30.0000	15.0000	10.4500	10.0000
	RPM	0.3050	1.0000	5.5000	0.2000
	RPMc	1.0000	1.0000	5.5000	0.2000
	RPMf	0.3050	0.0305	5.5000	0.2000
AC3 Aggregate Type	RPMc within AC3	0.1500	0.1500	0.1500	0.0001
	RPMf within AC3	0.1500	0.1500	0.1500	0.0001
	DPMc within AC3	2.0000	3.0000	3.0000	0.0005
	DPMf within AC3	1.5000	1.5000	1.5000	0.0003
	BIO(AC1) within AC3	0.6000	0.6000	0.6000	0.1000
	HUM(AC1) within AC3	0.0031	0.0031	0.0031	0.1000
	BIO(AC2) within AC3	0.6000	0.6000	0.6000	0.1000
	HUM(AC2) within AC3	0.0021	0.0021	0.0021	0.1000
	RPMf(AC2) within AC3	0.1069	0.1069	0.1069	0.0010
	DPMf(AC2) within AC3	1.5000	1.5000	1.5000	0.0050
AC2 Aggregate Type	BIO(AC2)	0.6000	0.6000	0.6000	0.1000
	HUM(AC2)	0.0051	0.0051	0.0051	0.1000

	RPMf(AC2)	0.2069	0.2069	0.2069	0.0100
	DPMf(AC2)	1.5000	1.5000	1.5000	0.0050
AC1 Aggregate Type	BIO(AC1)	0.6000	0.6000	0.6000	0.1000
	HUM(AC1)	0.0051	0.5000	0.0051	0.1000

Στον Πίνακα 17 φαίνονται οι ρυθμοί αποσύνθεσης για τις δυο περιοχές. Στα εδάφη μεγάλης ηλικίας του Damma οι ρυθμοί αποσύνθεσης του φρέσκου φυτικού υλικού είναι παρόμοιοι με αυτούς του Κοιλιάρη. Αυτό όπως έχει τονιστεί οφείλεται στην ανάπτυξη βλάστησης σε βάθος χρόνου. Οι ρυθμοί αποσύνθεσης στα κλάσματα των AC1, AC2 και AC3 όμως παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές σε σχέση με αυτούς του Κοιλιάρη. Κατά κύριο λόγο, ιδιαίτερα στην περίπτωση των μακρο-συσσωματωμάτων, οι ρυθμοί αποσύνθεσης στο Damma είναι κατά πολύ μικρότεροι, σε σχέση με τον Κοιλιάρη.

Πίνακας 18: Σύγκριση μακρο και μικρο συσσωμάτωσης - Κοιλιάρη-Damma

	Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι	Εδάφη μεγάλης ηλικίας
Proportional contribution of the components in aggregation				
Macroaggregation				
RPMc	0.1500	0.2000	0.1000	0.3500
DPMc	0.1500	0.2000	0.2000	0.5000
AC1	0.4500	0.5000	0.6500	0.1000
AC2	0.2500	0.1000	0.0500	0.0500
Microaggregation				
RPMf within AC3	0.2340	0.2340	0.2340	0.2000
DPMf within AC3	0.0000	0.0000	0.0000	0.7000
AC1 within AC3	0.7660	0.7660	0.7660	0.1000

Στον Πίνακα 18 παρατηρείται ότι στο Damma, για τη μακρο-συσσωμάτωση ευθύνεται κυρίως το φυτικό υλικό και πολύ λιγότερο τα AC2 και AC1. Κάτι παρόμοιο φάνηκε και στην περίπτωση της Μηλιάς όπου και εκεί το έδαφος είναι αμμώδες. Επίσης στη μικρο-συσσωμάτωση, στην περίπτωση του Damma, κυρίαρχο ρόλο παίζει το εύκολα αποσυντιθέμενο φυτικό υλικό στο AC3 και όχι το AC1 στο AC3 όπως στον Κοιλιάρη. Αυτό ενισχύει την παρατήρηση ότι τα συσσωματώματα στο Damma διαφέρουν από αυτά του Κοιλιάρη, καθώς πρόκειται για φυτικό υλικό με προσκολλημένα σωματίδια άμμου.

Πίνακας 19: Σύγκριση σταθερών διάσπασης μακρο-συσσωματωμάτων - Κουλιάρης-Damma

	Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι	Εδάφη μεγάλης ηλικίας
Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable	0.00200	0.00180	0.00150	0.00001
Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00200	0.00180	0.00150	0.00001
Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00200	0.00180	0.00150	0.00001

Στον Πίνακα 19 παρατηρείται ότι τα μακρο-συσσωματώματα στο Damma θεωρούνται πολύ πιο σταθερά και δύσκολα σπάνε.

Τα εδάφη του Κουλιάρη με τα εδάφη μεγάλης ηλικίας του Damma παρουσιάζουν ομοιότητες σε ό,τι αφορά τη διάσπαση του φυτικού υλικού που εισέρχεται στο έδαφος. Οι διαφορές τους αφορούν κυρίως τα συσσωματώματα κάθε περιοχής. Η μικρότερη παρουσία αργίλου στο Damma οδηγεί σε διαφορετικά συσσωματώματα από αυτά του Κουλιάρη. Οι ρυθμοί αποσύνθεσης του φυτικού υλικού στα συσσωματώματα του Damma είναι πολύ μικρότεροι με αποτέλεσμα να σπάνε πιο αργά, σε σχέση με αυτά του Κουλιάρη.

Δείκτες λειτουργίας του εδάφους

Δείκτης λειτουργίας εδάφους

Όπως προαναφέρθηκε τα εδάφη που μελετήθηκαν, θα χαρακτηριστούν με βάση το δείκτη λειτουργίας του εδάφους και τον εμπειρικό κανόνα για την αγρονομική του αξία. Ο δείκτης λειτουργίας του εδάφους SOC/(silt+clay) πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από 4,5 για να χαρακτηριστεί γόνιμο το έδαφος. Σύμφωνα με (Giannakis G.V. , Panakoulia S.K., Nikolaidis N.P., 2014) το όριο αυτό μετατοπίζεται στην τιμή 5,5 και ονομάζεται όριο ασφαλείας, ώστε το έδαφος να μη χάνει τις λειτουργίες του. Στον Πίνακα 20 φαίνονται οι τιμές του δείκτη SOC/(silt+clay) όπως υπολογίστηκαν για κάθε περιοχή, στο τέλος της προσομοίωσης.

Πίνακας 20: Τιμές δείκτη λειτουργίας του εδάφους SOC/(silt+clay) στο τέλος της προσομοίωσης κάθε περιοχής

		SOC/(silt+clay)
Κουλιάρης	Σχιστόλιθοι	7.25
	Μάργες	9.51
	Ασβεστόλιθοι	7.57
Μηλιά		16.37
Damma	Νέα εδάφη	0.30
	Εδάφη ενδιάμεσης ηλικίας	4.83
	Εδάφη μεγάλης ηλικίας	5.09

Στον Πίνακα 21 φαίνονται οι τιμές του άνθρακα που προέκυψαν για κάθε περιοχή. Στην τρίτη σειρά φαίνονται οι τιμές του άνθρακα για κάθε περιοχή στο τέλος της προσομοίωσης των 60 ετών, στην τέταρτη σειρά φαίνονται οι τιμές του άνθρακα για κάθε περιοχή οι οποίες ικανοποιούν το δείκτη $SOC/(silt+clay) = 4.5$ και στην πέμπτη σειρά φαίνονται αντίστοιχα οι τιμές του άνθρακα για κάθε περιοχή που ικανοποιούν την τιμή ασφαλείας του δείκτη $SOC/(silt+clay) = 5.5$.

Στη λεκάνη απορροής του Κουλιάρη ο άνθρακας στο τέλος κάθε προσομοίωσης είναι μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για να ικανοποιείται το όριο ασφαλείας του δείκτη. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5Σχήμα 6, στους Σχιστόλιθους το όριο $SOC/(silt+clay) = 4.5$ επιτυγχάνεται μετά από 15 χρόνια προσομοίωσης και το όριο ασφαλείας μετά από 31 χρόνια, στις Μάργες ο εδαφικός άνθρακας είναι σε όλα τα χρόνια της προσομοίωσης μεγαλύτερος από το όριο ασφαλείας και στους Ασβεστόλιθους το όριο ασφαλείας επιτυγχάνεται μετά από 9 χρόνια ενώ η οριακή τιμή ικανοποιείται πάντα. Σύμφωνα με το δείκτη $SOC/(silt+clay)$ τα εδάφη στη λεκάνη απορροής του Κουλιάρη ανακτούν τη γονιμότητά τους μετά από αγρανάπαυση.

Στην περίπτωση της Μηλιάς ο άνθρακας ικανοποιεί την τιμή ασφαλείας του δείκτη $SOC/(silt+clay)$ σε όλα τα χρόνια της προσομοίωσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Φαίνεται και πάλι η επίδραση που έχουν στο έδαφος οι ορθές καλλιεργητικές πρακτικές και η χρήση εδαφοβελτιωτικών.

Στα εδάφη του Damma ο άνθρακας δεν είναι ποτέ αρκετός ώστε να ικανοποιήσει την τιμή ασφαλείας του δείκτη (Σχήμα 14). Στα νέα εδάφη ο άνθρακας είναι πολύ μικρότερος από αυτόν που απαιτείται για να χαρακτηριστεί γόνιμο το έδαφος, ενώ στα εδάφη ενδιάμεσης και μεγάλης ηλικίας η οριακή τιμή του δείκτη ικανοποιείται μετά 42 και 35 χρόνια αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στη μείωση του (silt+clay) από τα εδάφη ενδιάμεσης ηλικίας στα εδάφη μεγάλης ηλικίας, το οποίο κατ' επέκταση οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις εδαφικού οργανικού άνθρακα στα εδάφη μεγάλης ηλικίας για την ικανοποίηση της οριακής τιμή του δείκτη.

Πίνακας 21: Σύγκριση των τιμών του άνθρακα στο τέλος της προσομοίωσης με τις αντίστοιχες τιμές που ικανοποιούν το δείκτη λειτουργίας του εδάφους SOC/(silt+clay) για οριακή τιμή 4.5 και τιμή ασφαλείας 5.5

Άνθρακας (t/ha)	Κουλιάρης			Μηλιά	Damma		
	Σχιστόλιθοι	Μάργες	Ασβεστόλιθοι		Νέα εδάφ η	Εδάφη ενδιάμεση ς ηλικίας	Εδάφη μεγάλη ς ηλικίας
Τέλος προσομοίωση ς	28.86	49.05	58.19	55.67	1.03	14.65	17.83
SOC/silt+clay = 4.5	17.91	23.22	34.60	15.30	15.36	13.65	15.75
SOC/silt+clay = 5.5	21.89	28.38	42.29	18.70	18.77	16.68	19.25

Εμπειρικός κανόνας για “εδάφη μεγάλης αγρονομικής αξίας”

Όπως προαναφέρθηκε οι (Banwart S, Bernasconi SM, Bloem J, Blum W, Brandao M, 2011) όρισαν τον εμπειρικό κανόνα για την αγρονομική αξία των εδαφών ως τη σχέση $AC3 > 60\%$.

Στην περιοχή του Κουλιάρη (Σχήμα 5) φαίνεται να ικανοποιείται ο κανόνας αυτός. Στους Σχιστόλιθους και Ασβεστόλιθους ο κανόνας ικανοποιείται οριακά καθώς τα μακρο-συσσωματώματα μειώνονται με το χρόνο και τείνουν να σταθεροποιηθούν στην οριακή τιμή του 60%.

Στην περιοχή της Μηλιάς (Σχήμα 9) η συνθήκη ικανοποιείται καθώς τα μακρο-συσσωματώματα τείνουν να σταθεροποιηθούν στην τιμή του 65% στο τέλος της προσομοίωσης

Στην περιοχή του Damma (Σχήμα 13) τα μακρο-συσσωματώματα είναι κάτω από το όριο του 60% για κάθε ηλικία εδάφους. Παρατηρείται σημαντική διαφορά ανάμεσα στα νέα εδάφη και τα εδάφη ενδιάμεσης και μεγάλης ηλικίας καθώς τα μακρο-συσσωματώματα έχουν τιμή 15% και 45% αντίστοιχα. Φαίνεται η βελτίωση της εδαφικής δομής στο μήκος της χρονοσειράς αλλά τα εδάφη μεγάλης ηλικίας δεν παρουσιάζουν βελτίωση ως προς τον κανόνα $AC3 > 60\%$, έναντι των εδαφών ενδιάμεσης ηλικίας, καθώς η αύξηση των $AC3$ είναι της τάξης του 3%. Οι τιμές των ποσοστών των $AC3$ συσσωματωμάτων κάθε περιοχής φαίνονται στον Πίνακα 22.

Πίνακας 22: Ποσοστό μακρο-συσσωματωμάτων κάθε περιοχής για αξιολόγηση αγρονομικής αξίας του εδάφους

		AC3 %
Κουλιάρης	Σχιστόλιθοι	63.0
	Μάργες	75.0
	Ασβεστόλιθοι	67.5
Μηλιά		64.9
Damma	Νέα εδάφη	15.4
	Εδάφη ενδιάμεσης ηλικίας	43.8
	Εδάφη μεγάλης ηλικίας	46.4

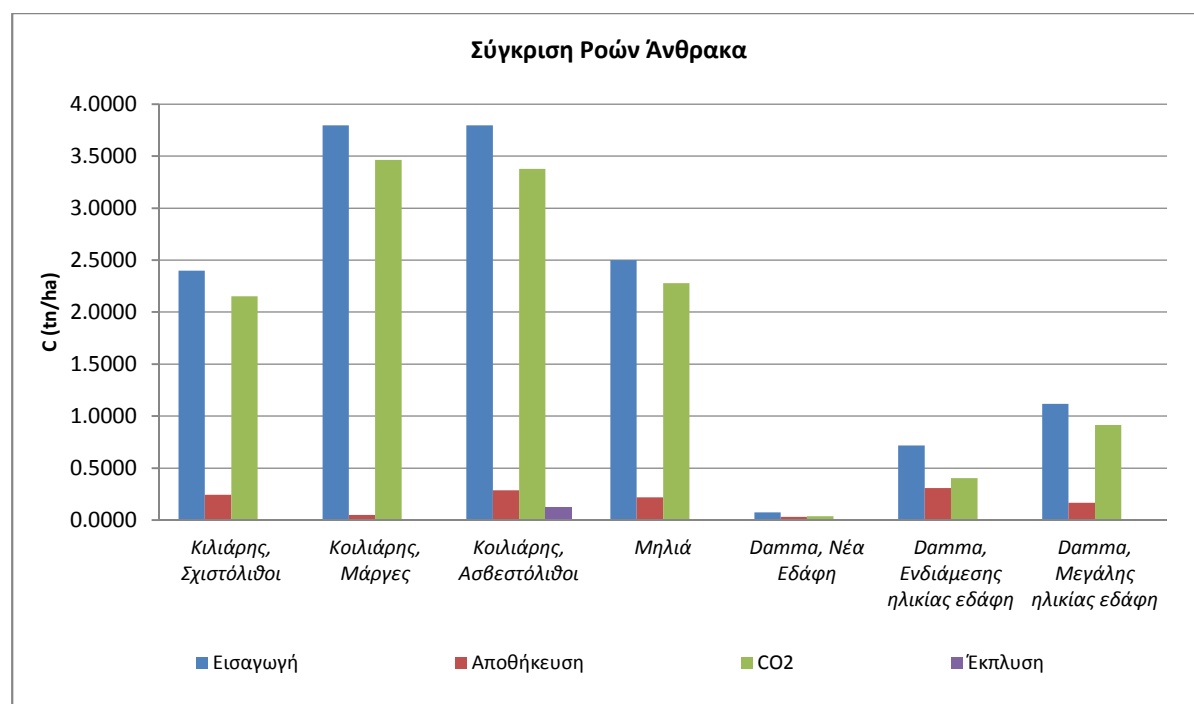
Συγκεντρωτικοί Πίνακες

Στον Πίνακα 23 συνοψίζονται οι τιμές των ροών άνθρακα που εξήχθησαν από το μοντέλο

Πίνακας 23: Ροές άνθρακα περιοχών προσομοίωσης

		Ετήσιες τιμές ροών άνθρακα (tn C/ha)			
		Εισαγωγή	Αποθήκευση	CO2	Έκπλυση
Κουλιάρης	Σχιστόλιθοι	2.4000	0.2444	2.1515	0.0000
	Μάργες	3.7950	0.0489	3.4644	0.0000
	Ασβεστόλιθοι	3.7950	0.2866	3.3776	0.1251
Μηλιά		3.7500	0.2188	2.2782	0.0000
	Νέα εδάφη	0.0730	0.0304	0.0363	0.0000
Damma	Πρώθηση παγετώνα	0.0000	0.0032	0.0028	0.0000
	Μέσης ηλικίας εδάφη	0.7162	0.3090	0.4023	0.0000
	Πρώθηση παγετώνα	0.2000	-0.0981	0.2943	0.0000
	Μεγάλης ηλικίας εδάφη	1.1175	0.1082	0.9152	0.0000

Στο Διάγραμμα 7 απεικονίζονται σχηματικά οι ετήσιες ροές άνθρακα για κάθε περιοχή



Διάγραμμα 7: Σύγκριση ροών άνθρακα περιοχών προσομοίωσης

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μοντέλο CAST προσομοίωσε ικανοποιητικά τις περιοχές του Κοιλιάρη, της Μηλιάς και του παγετώνα Damma με βάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το πεδίο για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Παρά τις μεγάλες διαφορές των περιοχών αυτών σε ό,τι αφορά το κλίμα, τη λιθολογία, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη γεωγραφική θέση, το μοντέλο προσαρμόστηκε και μετά τη βαθμονόμηση, προσομοίωσε τη δομή του εδάφους και τις ροές του άνθρακα σε βάθος χρόνου 60 ετών.

Τα συγκριτικά αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση των εδαφών συνοψίζονται ως εξής:

Λεκάνη απορροής ποταμού Κοιλιάρη – Σημεία με διαφορετική λιθολογία

- Τη μεγαλύτερη αποθήκευση άνθρακα παρουσιάζουν οι Σχιστόλιθοι, στη συνέχεια οι Ασβεστόλιθοι και πολύ λιγότερο οι Μάργες. Ο δείκτης λειτουργίας του εδάφους SOC/(silt+clay) έδειξε μεγαλύτερο βαθμό γονιμότητας στις Μάργες καθώς ο άνθρακας, αν και δε μεταβλήθηκε σημαντικά στα 60 χρόνια της προσομοίωσης, είχε σταθερά υψηλές τιμές.
- Οι παράμετροι βαθμονόμησης έδειξαν σημαντικές ομοιότητες μέσα στη λεκάνη απορροής, με βασικές διαφορές στους ρυθμούς αποσύνθεσης του φρέσκου φυτικού υλικού που εισέρχεται στο έδαφος.

Μηλιά

- Παρατηρείται μεγάλη αποθήκευση άνθρακα στο έδαφος για όσο διάστημα εφαρμόζεται σε αυτό εδαφοβελτιωτικό
- Οι πρακτικές διαχείρισης βελτιώνουν τη δομή του εδάφους, όπως φαίνεται από το δείκτη λειτουργίας του εδάφους SOC/(silt+clay) και τον εμπειρικό κανόνα για "εδάφη μεγάλης αγρονομικής αξίας" στο τέλος της προσομοίωσης των 60 χρόνων, που έγινε μετά το πέρας της χρήσης εδαφοβελτιωτικού

Χρονοσειρά Damma

- Καθώς κινούμαστε κατά μήκος της χρονοσειράς από τα νέα εδάφη προς τα εδάφη μεγάλης ηλικίας, φαίνεται η αλλαγή στη δομή του εδάφους, καθώς αυξάνονται τα μακρο-συσσωματώματα και το πορώδες του εδάφους
- Ο ΕΟΑ αυξάνεται σημαντικά στο μήκος της χρονοσειράς καθώς αναπτύσσεται το οικοσύστημα της περιοχής. Η αποθήκευση είναι μεγαλύτερη στα νέα και ενδιάμεσης ηλικίας εδάφη, καθώς στα μεγάλης ηλικίας εδάφη το σύστημα φτάνει σε πιο σταθερές συνθήκες με την πλήρη ανάπτυξη του οικοσυστήματος.
- Ο δείκτης λειτουργίας του εδάφους SOC/(silt+clay) και ο εμπειρικός κανόνας αγρονομικής αξίας των εδαφών, έδειξαν την ανάπτυξη της δομής και των λειτουργιών του εδάφους καθώς μεγαλώνει η ηλικία του. Φαίνεται επίσης ότι τα εδάφη μεγάλης ηλικίας είναι ακόμα νέα σε σχέση με τα εδάφη του Κοιλιάρη λόγω τις μικρής βελτίωσης (με βάση του δείκτες αυτούς) που παρουσιάζουν έναντι των εδαφών ενδιάμεσης ηλικίας.
- Οι παράμετροι βαθμονόμησης έδειξαν γενικά, σε όλο το μήκος της χρονοσειράς, μικρούς ρυθμούς αποσύνθεσης. Ουσιαστική διαφορά παρουσιάζεται στους ρυθμούς αποσύνθεσης

του φρέσκου φυτικού υλικού λόγω της σταδιακής ανάπτυξης της βλάστησης και τις εμφάνισης των αποικοδομητών.

Κοιλιάρης – Μηλιά

- Μεταξύ των δυο περιοχών παρατηρείται εντονότερος θρυμματισμός στην περίπτωση της Μηλιάς, λόγω της δράσης της εδαφικής πανίδας.
- Η αποσύνθεση του φρέσκου φυτικού υπολείμματος στη Μηλιά γίνεται με πιο αργούς ρυθμούς.
- Στην περιοχή της Μηλιάς οι ρυθμοί αποσύνθεσης είναι αρκετά μικρότεροι σε σχέση με τη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη, λόγω των καλλιεργητικών πρακτικών που έχουν εφαρμοστεί στη Μηλιά, όπως η χρήση εδαφοβελτιωτικού και η εναλλαγή καλλιέργειας και αγρανάπαυσης.
- Η δομή του εδάφους παρουσιάζει διαφορές καθώς η συσσωμάτωση στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη έγκειται κυρίως στη συμμετοχή των μικρο-συσσωματωμάτων και των συσσωματωμάτων αργίλου-ιλύος, ενώ στη Μηλιά το φυτικό υλικό είναι αυτό που παίζει σημαντικό ρόλο στη συσσωμάτωση.
- Λόγω της διαφορετικής σύνθεσης των συσσωματωμάτων, τα μακρο-συσσωματώματα στη Μηλιά είναι πιο ασταθή με αποτέλεσμα να σπάνε πιο εύκολα.

Κοιλιάρης – Damma (μεγάλης ηλικίας εδάφη)

- Η λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη και τα εδάφη μεγάλης ηλικίας του Damma παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές σε ότι αφορά τους ρυθμούς αποσύνθεσης του φρέσκου φυτικού υλικού. Αυτό σημαίνει ότι το οικοσύστημα στα εδάφη αυτά του Damma έχει αναπτυχθεί σε σημαντικό βαθμό.
- Μεγάλες διαφορές παρατηρούνται στους ρυθμούς αποσύνθεσης των συσσωματωμάτων μεταξύ των δυο περιοχών. Στο Damma οι ρυθμοί αυτοί είναι πολύ χαμηλοί σε σχέση με τα εδάφη στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη. Αυτό δείχνει μεγαλύτερους χρόνους παραμονής των συσσωματωμάτων στα εδάφη του Damma. Παρόλο που η σύγκριση γίνεται με τα εδάφη μεγάλης ηλικίας του Damma, τα εδάφη αυτά εξακολουθούν να είναι μικρής ηλικίας σε σχέση με τα εδάφη του Κοιλιάρη.
- Σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δυο περιοχές είναι και τα συστατικά της συσσωμάτωσης. Στη λεκάνη απορροής του Κοιλιάρη, όπως έχει αναφερθεί, τα συσσωματώματα δημιουργούνται κατά κύριο λόγο από τα μικρο-συσσωματώματα και συσσωματώματα αργίλου-ιλύος, ενώ στο Damma συμμετέχει κυρίως το φυτικό υλικό.
- Τα μακρο-συσσωματώματα στο Damma φαίνονται να είναι πιο σταθερά από αυτά του Κοιλιάρη, καθώς αντιστέκονται ισχυρά στη διάσπαση.

Τα αποτελέσματα ικανοποιούν το θεωρητικό υπόβαθρο για τα υποβαθμισμένα εδάφη, την επίδραση των αγροτικών πρακτικών και την εξέλιξη της δομής από την ανάπτυξη οικοσυστημάτων σε νέα εδάφη.

Παρ' όλα αυτά το μοντέλο CAST είναι ένα νέο μοντέλο το οποίο βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης και της επαλήθευσης. Στην νέα του έκδοση έχει συμπεριληφθεί η επιλογή του οργάνου σε οποιοδήποτε στάδιο της προσομοίωσης, δίνοντας την επιλογή για έντονο ή ελαφρύ

όργανο ανάλογα με τους ρυθμούς διάσπασης (disruption) των μακρο-συσσωματωμάτων που θα δώσει ο χρήστης.

Στην παρούσα φάση βρίσκεται υπό δοκιμή η τρίτη έκδοση του μοντέλου, η οποία θα δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης εδαφών τα οποία υφίστανται ακραίες κλιματικές μεταβολές σε συγκεκριμένους μήνες της προσομοίωσης. Μέχρι στιγμής οι παράμετροι βαθμονόμησης του μοντέλου είναι σταθερές στο σύνολο του χρόνου της προσομοίωσης. Με τη νέα αυτή έκδοση θα δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να αλλάζουν οι παράμετροι βαθμονόμησης και κυρίως οι ρυθμοί αποσύνθεσης, σε ακραίες κλιματικές μεταβολές, όπως η κάλυψη του εδάφους με πάγο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες κατά τη χειμερινή περίοδο (επιλογή frozen soil).

Παράλληλα με τις νέες εκδόσεις του μοντέλου, μελετάται και η δυνατότητα μείωσης των παραμέτρων βαθμονόμησης. Όπως έχει αναφερθεί, το μοντέλο χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων βαθμονόμησης, κάτι το οποίο καθιστά δύσκολη τη βαθμονόμηση από νέους χρήστες. Σκοπός είναι μετά από προσομοιώσεις πολλών διαφορετικών περιοχών, να δημιουργηθεί μια βάση δεδομένων, ώστε να βρεθούν εκείνες οι παράμετροι βαθμονόμησης, οι οποίες θα μπορούσαν να έχουν προεπιλεγμένες τιμές, ανάλογα με το κλίμα, τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τη φυτοκάλυψη και άλλα δεδομένα εισαγωγής που θα ορίζει ο χρήστης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Amezketā, E. (1999). Soil aggregate stability: a review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 37–41. doi:10.1300/J064v14n02_08
- Andrianaki, M. (2014). Application of the Roth-C and CAST models for the modelling of soil organic carbon and soil structure dynamics at the Damma Glacier CZO. *Geoderma*.
- Angers, D., Recous, S., & Aita, C. (1997). Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of ¹³C/¹⁵N-labelled wheat straw in situ. *European Journal of Soil Science*, 48, 295–300. doi:10.1111/j.1365-2389.1997.tb00549.x
- Banwart S, Bernasconi SM, Bloem J, Blum W, Brandao M, B. S. (2011). Soil processes and functions in critical zone observatories: Hypotheses and experimental design. *Vadose Zone Journal*, 10(3), 974–987.
- Banwart, S., Bernasconi, S. M., Bloem, J., Blum, W., Brandao, M., Brantley, S., ... Zhang, B. (2011). Soil Processes and Functions in Critical Zone Observatories: Hypotheses and Experimental Design. *Vadose Zone Journal*, 10(3), 974. doi:10.2136/vzj2010.0136
- Bernasconi, S. M., Bauder, A., Bourdon, B., Brunner, I., Bünemann, E., Chris, I., ... Zumsteg, A. (2011). Chemical and Biological Gradients along the Damma Glacier Soil Chronosequence, Switzerland. *Vadose Zone Journal*, 10(3), 867. doi:10.2136/vzj2010.0129
- Blum, W. E. H. (2005). Functions of Soil for Society and the Environment. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4(3), 75–79. doi:10.1007/s11157-005-2236-x
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A. C., & Soriano-Soto, M. D. (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. doi:10.1016/S0341-8162(00)00176-4
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A. C., Soriano-Soto, M. D., & Tiemessen, I. R. (1998). Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil aggregation and other soil properties along a mediterranean climatological gradient. *Catena*, 33, 123–138. doi:10.1016/S0341-8162(98)00048-4
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3–22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.03.005
- Christensen, B. T. (2001). Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science*. doi:10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x
- Coleman, K., Jenkinson, D. S. (1999). *RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil: Model description and windows users guide: November 1999 issue. Lawes Agricultural Trust Harpenden. ISBN 0 951 4456 8 5.*
- Denef, K., Six, J., Paustian, K., & Merckx, R. (2001). Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-

- wet cycles. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(15), 2145–2153. doi:10.1016/S0038-0717(01)00153-5
- Edwards, A., & Bremner, J. (1967). MICROAGGREGATES IN SOILS1. *Journal of Soil Science*, 18, 64–73. doi:10.1111/j.1365-2389.1967.tb01488.x
- Elliott, E. T., & Coleman, D. C. (1988). Let the Soil Work for Us. *Ecological Bulletins*, 23–32. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/20112982> \n <http://www.jstor.org/stable/pdfplus/20112982.pdf?acceptTC=true>
- Elliott, E.T., 1986. (1986). Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, (50), 627–633.
- Franzluebbers, A. J. (2002). Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil and Tillage Research*, 66, 197–205. doi:10.1016/S0167-1987(02)00027-2
- Franzluebbers, A. J., Haney, R. L., Honeycutt, C. W., Arshad, M. A., Schomberg, H. H., & Hons, F. M. (2001). Climatic influences on active fractions of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 1103–1111. doi:10.1016/S0038-0717(01)00016-5
- Giannakis G.V. , Panakoulia S.K., Nikolaidis N.P., P. N. V. (2014). Simulating Soil Fertility Restoration using the CAST model. *Procedia Earth and Planetaru Science, in press*.
- Golchin A. Skjemstad J.O., C. P. (1994). Study of Free and Occluded Particulate Organic Matter in Soils by Solid state ¹³C CP/MAS \n NMR Spectroscopy and Scanning Electron Microscopy. *Australian Journal of Soil Research*, 32, 285–309. doi:10.1071/SR9940285
- 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(2-3), 297–307. doi:10.1016/j.scitotenv.2007.11.013
- Guelland, K., Hagedorn, F., Smittenberg, R. H., Göransson, H., Bernasconi, S. M., Hajdas, I., & Kretzschmar, R. (2012). Evolution of carbon fluxes during initial soil formation along the forefield of Damma glacier, Switzerland. *Biogeochemistry*, 113(1-3), 545–561. doi:10.1007/s10533-012-9785-1
- Haynes, R. J., & Beare, M. H. (1997). Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 1647–1653. doi:10.1016/S0038-0717(97)00078-3
- Haynes, R. J., & Naidu, R. (1998). Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51, 123–137. doi:10.1023/A:1009738307837
- Jacinthe, P. A., Lal, R., & Kimble, J. M. (2002). Carbon dioxide evolution in runoff from simulated rainfall on long-term no-till and plowed soils in southwestern Ohio. *Soil and Tillage Research*, 66, 23–33. doi:10.1016/S0167-1987(02)00010-7

- Jastrow, J. D. (1996). Soil aggregate formation and accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 665–676.
- Jastrow, J. D., Miller, R. M., & Lussenhop, J. (1998). Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 30, 905–916. doi:10.1016/S0038-0717(97)00207-1
- Lal, R. (1991). Soil Structure and Sustainability. *Journal of Sustainable Agriculture*. doi:10.1300/J064v01n04_06
- Lal, R., Mahboubi, A. A., & Fausey, N. R. (1994). Long-Term Tillage and Rotation Effects on Properties of a Central Ohio Soil. *Soil Science Society of America Journal*. doi:10.2136/sssaj1994.03615995005800020038x
- Langmaack, M. (1999). Earthworm communities in arable land influenced by tillage, compaction, and soil. *Zeitschrift Fur Okologie Und Naturschutz*, 8, 11–21. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0033376101&partnerID=40&md5=c8a0393ded7795dcfeb875537ad447bd>
- Magill, A. H., & Aber, J. D. (1998). Long-term effects of experimental nitrogen additions on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems. *Plant and Soil*, 203, 301–311. doi:10.1023/A:1004367000041
- Malamoud, K., McBratney, A. B., Minasny, B., & Field, D. J. (2009). Modelling how carbon affects soil structure. *Geoderma*, 149, 19–26. doi:10.1016/j.geoderma.2008.10.018
- Martens, D. A. (2000). Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 361–369. doi:10.1016/S0038-0717(99)00162-5
- McGill, W. B. (1996). Review and Classification of Ten Soil Organic Matter (SOM) Models. *NATO ASI Series I Global Environmental Change*.
- Mendes, I. C., Bandick, A. K., Dick, R. P., & Bottomley, P. J. (1999). Microbial Biomass and Activities in Soil Aggregates Affected by Winter Cover Crops. *Soil Science Society of America Journal*. doi:10.2136/sssaj1999.634873x
- Menon, M., Rousseva, S., Nikolaidis, N. P., van Gaans, P., Panagos, P., de Souza, D. M., ... Banwart, S. a. (2014). SoilTrEC: a global initiative on critical zone research and integration. *Environmental Science and Pollution Research International*, 21(4), 3191–5. doi:10.1007/s11356-013-2346-x
- Nelson, G. C., Bennett, E., Berhe, A. A., Cassman, K., Defries, R., Dietz, T., ... Ojima, D. (2006). Anthropogenic Drivers of Ecosystem Change : an Overview. *Ecology And Society*, 11, 29. doi:29
- Nikolaidis, N. P. (2011). Human impacts on soils: Tipping points and knowledge gaps. *Applied Geochemistry*, 26, S230–S233. doi:10.1016/j.apgeochem.2011.03.111
- Nikolaidis, N. P., & Bidoglio, G. (2013). Soil Organic Matter Dynamics and Structure. *Sustainable Agriculture Reviews*, 12. doi:10.1007/978-94-007-5961-9

- Oades, J. M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76, 319–337. doi:10.1007/BF02205590
- Oades, J., & Waters, A. (1991). Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*. doi:10.1071/SR9910815
- Pachepsky, Y. A., & Rawls, W. J. (2003). Soil structure and pedotransfer functions. *European Journal of Soil Science*, 54, 443–451. doi:10.1046/j.1365-2389.2003.00485.x
- Pagliai, M., Vignozzi, N., & Pellegrini, S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, 79(2), 131–143. doi:10.1016/j.still.2004.07.002
- Paustian, K., Collins, H. P., & Paul, E. A. (1997). Management Controls on Soil Organic Carbon. In *Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems* (pp. 15–49).
- Piccolo, A., Pietramellara, G., & Mbagwu, J. S. C. (1997). Use of humic substances as soil conditioners to increase aggregate stability. *Geoderma*, 75, 267–277. doi:10.1016/S0016-7061(96)00092-4
- Plante, Alain F., McGill, W. B. (2002). Interseasonal soil macroaggregate dynamics in two contrasting field soils using labeled tracer spheres. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 1285–1295.
- Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 6, 317–327. doi:10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x
- Quiroga A, Funaro D, Noellemeyer E, P. N. (2006). Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.*, 90, 63–68.
- Rampazzo, N., Blum, W. E. H., & Wimmer, B. (1998). Assessment of soil structure parameters and functions in agricultural soils. *Bodenkultur*, 49, 69–84.
- Richardson, R. B. (2010). Ecosystem Services and Food Security: Economic Perspectives on Environmental Sustainability. *Sustainability*. doi:10.3390/su2113520
- Schulten, H.-R., & Leinweber, P. (2000). New insights into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure. *Biology and Fertility of Soils*. doi:10.1007/s003740050020
- Schutter, M. E., & Dick, R. P. (2002). Microbial Community Profiles and Activities among Aggregates of Winter Fallow and Cover-Cropped Soil. *Soil Science Society of America Journal*. doi:10.2136/sssaj2002.0142
- Segoli, M., De Gryze, S., Dou, F., Lee, J., Post, W. M., Denef, K., & Six, J. (2013). AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies. *Ecological Modelling*, 263, 1–9. doi:10.1016/j.ecolmodel.2013.04.010
- Seta, A. K., & Karathanasis, A. D. (1996). Water dispersible colloids and factors influencing their dispersibility from soil aggregates. *Geoderma*, 74, 255–266. doi:10.1016/S0016-7061(96)00066-3

- 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(1), 7–31. doi:10.1016/j.still.2004.03.008
- Six, J., Conant, R., Paul, E., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 155–176. Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1023/A:1016125726789>
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. doi:10.1023/A:1016125726789
- Six, J., Elliott, E. ., & Paustian, K. (2000). Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14), 2099–2103. doi:10.1016/S0038-0717(00)00179-6
- Six, J., Elliott, E. T., & Paustian, K. (1999). Aggregate and Soil Organic Matter Dynamics under Conventional and No-Tillage Systems. *Soil Science Society of America Journal*. doi:10.2136/sssaj1999.6351350x
- Six, J., Elliott, E. T., Paustian, K., & Doran, J. W. (1998). Aggregation and Soil Organic Matter Accumulation in Cultivated and Native Grassland Soils. *Soil Science Society of America Journal*. doi:10.2136/sssaj1998.03615995006200050032x
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S. M., de Moraes, J. C., & Albrecht, A. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755–775. doi:10.1051/agro
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S. M., de Moraes Sá, J. C., & Albrecht, A. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effect of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755–775.
- Six, J., & Jastrow, J. (2002). Organic matter turnover. *Encyclopedia of Soil Science*, 936–942. Retrieved from <http://www.plantsciences.ucdavis.edu/agroecology/staff/documents/encycl.pdf>
- Six, J., Paustian, K., Elliott, E. T., & Combrink, C. (2000). Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 681–689. doi:10.2136/sssaj2000.642681x
- Sollins, P., Homann, P., & Caldwell, B. A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma*, 74, 65–105. doi:10.1016/S0016-7061(96)00036-5
- Stamati, F. E. (2012). *CARBON AND NITROGEN CYCLING IN AGRICULTURAL LANDS*. TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE.
- Stamati, F. E., Nikolaidis, N. P., Banwart, S., & Blum, W. E. H. (2013). A coupled carbon, aggregation, and structure turnover (CAST) model for topsoils. *Geoderma*, 211-212, 51–64. doi:10.1016/j.geoderma.2013.06.014

Thomsen, I. K., Schjonning, P., Jensen, B., Kristensen, K., & Christensen, B. T. (1999). Turnover of organic matter in differently textured soils. II. Microbial activity as influenced by soil water regimes. *Geoderma*, 89, 199–218. doi:10.1016/S0016-7061(98)00084-6

Tisdall, J., & Oades, J. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 141–163. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x/full>

TUC HERS LAB. (2012). Cast model User Manual. Chania: TUC HERS LAB.

ΒΑΒΛΑΣ. (2013). ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ COMPOST ΣΤΗΝ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΣΤΑ ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ - ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΛΙΑΣ ΧΑΝΙΩΝ. ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακες δεδομένων εισόδου-βαθμονόμησης του CAST και διαγράμματα εξόδου για κάθε περιοχή προσομοίωσης

ΚΟΙΛΙΑΡΗΣ

1η ομάδα προσομοίωσης - Σχιστόλιθοι

Input data

INPUT DATA							Total simulation time
# Year	# Month	PLANT	TEMPERATURE	PRECIPITATION	PAN EVAPORATION	COVER (1 if soil is covered with vegetation, 0 if not)	
1	1	0.2	10.8	141.6	68.1	1	60
	2	0.2	11.1	112.4	76.3	1	
	3	0.2	12.6	80.6	107.2	1	
	4	0.2	15.8	31.7	149.2	1	
	5	0.2	20.0	13.0	211.3	1	
	6	0.2	24.3	4.5	270.3	1	
	7	0.2	26.3	1.2	295.9	1	
	8	0.2	25.7	1.5	265.5	1	
	9	0.2	23.0	18.7	189.5	1	
	10	0.2	19.0	80.0	125.2	1	
	11	0.2	15.6	72.8	84.9	1	
	12	0.2	12.6	93.9	72.7	1	
...	1	0.2	10.8	141.6	68.1	1	
	2	0.2	11.1	112.4	76.3	1	
	3	0.2	12.6	80.6	107.2	1	
	4	0.2	15.8	31.7	149.2	1	
	5	0.2	20.0	13.0	211.3	1	
	6	0.2	24.3	4.5	270.3	1	
	7	0.2	26.3	1.2	295.9	1	
	8	0.2	25.7	1.5	265.5	1	
	9	0.2	23.0	18.7	189.5	1	
	10	0.2	19.0	80.0	125.2	1	
	11	0.2	15.6	72.8	84.9	1	
	12	0.2	12.6	93.9	72.7	1	
60	1	0.2	10.8	141.6	68.1	1	
	2	0.2	11.1	112.4	76.3	1	
	3	0.2	12.6	80.6	107.2	1	
	4	0.2	15.8	31.7	149.2	1	
	5	0.2	20.0	13.0	211.3	1	
	6	0.2	24.3	4.5	270.3	1	
	7	0.2	26.3	1.2	295.9	1	
	8	0.2	25.7	1.5	265.5	1	
	9	0.2	23.0	18.7	189.5	1	
	10	0.2	19.0	80.0	125.2	1	
	11	0.2	15.6	72.8	84.9	1	
	12	0.2	12.6	93.9	72.7	1	

Input data parameters

Thickness of soil (in cm)	Bulk Density BD (kg/m3)	clay content (in %)	silt-clay (in %)	IOM (cell comment has intructions)	Total soil IOM (t/ha)	IOM_AC1 (t/ha)
10	1200	13.1	39.8	0	0	0

IOM_AC2 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	Total soil SOC for IOM calculation (t/ha)	Saturation capacity of silt-clay fraction (SC-SC) (cell <u>comment</u> has intructions)	SC-SC. The maximum concentration of the silt clay fraction in carbon (g C/g soil)
0	0	0	0	0	55

MODEL PARAMETERS				OTHER MODEL PARAMETERS (these parameters should be left as default and be changed only if numerical errors happen)	
dpm_to_rpm_ratio (use 0.67 for shrubland and unimproved grassland, 0.25 for forest)	%(1-CO2) partitioning on BIO and HUM	Mass AC2 fraction	Mass AC3 fraction	limit for numerical errors	limit of C (t/ha) below which no aggregation or destruction takes place
0.6700	0.4495	0.21	0.79	0.000000000001	0.010

Initial Conditions

INITIAL CONDITIONS (t/ha)		
fresh plant input (t/ha)		
DPM		0.0000
RPM		0.0000
RPMc		0.0000
RPMf		0.0000
AC3 Aggregate type (t/ha)		
RPMc		2.8390
DPMc		0.5010
RPMf		0.0000
DPMf		0.0000
AC1 within AC3 (t/ha)		
BIO		0.1715
HUM		3.2579
AC2 within AC3 (t/ha)		
RPMf		0.5763
DPMf		0.5763
BIO		0.0429
HUM		0.8145
AC2 Aggregate type (t/ha)		
RPMf		0.8649
DPMf		0.8649
BIO		0.0865
HUM		1.6435
AC1 Aggregate type (t/ha)		
BIO		0.0980

	HUM	1.8620
Initial distribution (%) of the silt clay mass in the aggregate types		
	AC1	35.9500
	AC2	23.6800
	AC1 within AC3	32.3000
	AC2 within AC3	8.0700
Fraction of sand mass in the aggregate types		
	fsand_AC2	0.2100
	fsand_AC3	0.7900

Calibration parameters

RATE CONSTANTS (1/y)		
	Fragmentation	
	RPM to RPMc	15.0000
	RPMc to RPMf	0.0000
	RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.1000
	DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.5000
	Macroaggregation	
	RPMc	0.6000
	DPMc	0.4700
	Microaggregation	
	k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.8000
	k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.8000
fresh plant input	Decomposition	
	DPM	30.0000
	RPM	0.3050
	RPMc	1.0000
AC3 Aggregate Type	RPMf	0.3050
	RPMc within AC3	0.1500
	RPMf within AC3	0.1500
	DPMc within AC3	3.0000
	DPMf within AC3	1.5000
	BIO(AC1) within AC3	0.6000
	HUM(AC1) within AC3	0.0031
	BIO(AC2) within AC3	0.6000
	HUM(AC2) within AC3	0.0021
	RPMf(AC2) within AC3	0.1069
	DPMf(AC2) within AC3	1.5000
AC2 Aggregate Type	BIO(AC2)	0.6000
	HUM(AC2)	0.0051
	RPMf(AC2)	0.2069
	DPMf(AC2)	1.5000
AC2 Aggregate Type	BIO(AC1)	0.6000

		HUM(AC1)	0.0051
Proportional contribution of the components in aggregation			
Macroaggregation			
		RPMc	0.1500
		DPMc	0.1500
		AC1	0.4500
		AC2	0.2500
Microaggregation			
		RPMf within AC3	0.2340
		DPMf within AC3	0.0000
		AC1 within AC3	0.7660
		Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable	0.00150
		Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00150
		Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00150
		Fraction of the decomposition products (BIO and HUM) that goes to the respective BIO and HUM pool	
RPMc and RPMf within AC3		to AC1 within AC3	0.9500
		to AC1	0.0500
AC1 within AC3		to AC1 within AC3	0.9500
		to AC1	0.0500
AC2 within AC3		to AC2 within AC3	0.9500
		to AC1 within AC3	0.0250
		to AC1	0.0250
AC2		to AC2	0.9500
		to AC1	0.0500
OTHER CALIBRATION PARAMETERS			
Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)			
macro-aggregation		AC1	0.4200
macro-aggregation		AC2	2.0000
micro-aggregation		AC1 within AC3	0.1600
Particle density of the mineral phase and the organic matter (g/cm3)			
		bd_m	2.2000
		bd_om	0.7000

2^η Ομάδα προσομοίωσης - Μάργες

Input data

INPUT DATA							
# Year	# Month	PLANT	TEMPERATURE	PRECIPITATION	PAN EVAPORATION	COVER (1 if soil is covered with vegetation, 0 if not)	Total simulation time
1	1	0.3	10.8	141.6	68.1	1	60
	2	0.3	11.1	112.4	76.3	1	

	3	0.3	12.6	80.6	107.2	1
	4	0.3	15.8	31.7	149.2	1
	5	0.3	20.0	13.0	211.3	1
	6	0.3	24.3	4.5	270.3	1
	7	0.3	26.3	1.2	295.9	1
	8	0.3	25.7	1.5	265.5	1
	9	0.3	23.0	18.7	189.5	1
	10	0.3	19.0	80.0	125.2	1
	11	0.3	15.6	72.8	84.9	1
	12	0.3	12.6	93.9	72.7	1
...	1	0.3	10.8	141.6	68.1	1
	2	0.3	11.1	112.4	76.3	1
	3	0.3	12.6	80.6	107.2	1
	4	0.3	15.8	31.7	149.2	1
	5	0.3	20.0	13.0	211.3	1
	6	0.3	24.3	4.5	270.3	1
	7	0.3	26.3	1.2	295.9	1
	8	0.3	25.7	1.5	265.5	1
	9	0.3	23.0	18.7	189.5	1
	10	0.3	19.0	80.0	125.2	1
	11	0.3	15.6	72.8	84.9	1
	12	0.3	12.6	93.9	72.7	1
60	1	0.3	10.8	141.6	68.1	1
	2	0.3	11.1	112.4	76.3	1
	3	0.3	12.6	80.6	107.2	1
	4	0.3	15.8	31.7	149.2	1
	5	0.3	20.0	13.0	211.3	1
	6	0.3	24.3	4.5	270.3	1
	7	0.3	26.3	1.2	295.9	1
	8	0.3	25.7	1.5	265.5	1
	9	0.3	23.0	18.7	189.5	1
	10	0.3	19.0	80.0	125.2	1
	11	0.3	15.6	72.8	84.9	1
	12	0.3	12.6	93.9	72.7	1

Input data parameters

Thickness of soil (in cm)	Bulk Density BD (kg/m3)	clay content (in %)	silt-clay (in %)	IOM (cell comment has intructions)	Total soil IOM (t/ha)	IOM_AC1 (t/ha)
10	1080	16.5	51.6	0	0	0

IOM_AC2 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	Total soil SOC for IOM calculation (t/ha)	Saturation capacity of silt-clay fraction (SC-SC) (cell <u>comment</u> has intructions)	SC-SC. The maximum concentration of the silt clay fraction in carbon (g C/g soil)
0	0	0	0	0	55

MODEL PARAMETERS				OTHER MODEL PARAMETERS (these parameters should be left as default and be changed only if numerical errors happen)	
dpm_to_rpm_ratio (use 0.67 for shrubland and unimproved grassland, 0.25 for forest)	%(1-CO2) partitioning on BIO and HUM	Mass AC2 fraction	Mass AC3 fraction	limit for numerical errors	limit of C (t/ha) below which no aggregation or destruction takes place
1.0000	0.4495	0.16	0.84	0.0000000000001	0.010

Initial Conditions

INITIAL CONDITIONS (t/ha)		
fresh plant input (t/ha)		
DPM		0.0000
RPM		0.0000
RPMc		0.0000
RPMf		0.0000
AC3 Aggregate type (t/ha)		
RPMc		9.6815
DPMc		1.7085
RPMf		0.0000
DPMf		0.0000
AC1 within AC3 (t/ha)		
BIO		1.0605
HUM		20.1497
AC2 within AC3 (t/ha)		
RPMf		0.1137
DPMf		0.1137
BIO		0.2651
HUM		5.0374
AC2 Aggregate type (t/ha)		
RPMf		1.2750
DPMf		1.2750
BIO		0.1533
HUM		2.9123
AC1 Aggregate type (t/ha)		
BIO		0.1185
HUM		2.2515
Initial distribution (%) of the silt clay mass in the aggregate types		

	AC1	18.1400
	AC2	22.1400
	AC1 within AC3	47.7800
	AC2 within AC3	11.9400
Fraction of sand mass in the aggregate types		
	fsand_AC2	0.1600
	fsand_AC3	0.8400

Calibration parameters

RATE CONSTANTS (1/y)			
	Fragmentation		
		RPM to RPMc	15.0000
		RPMc to RPMf	0.0000
		RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.1000
		DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.5000
	Macroaggregation		
		RPMc	0.6000
		DPMc	0.4700
	Microaggregation		
		k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000
		k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000
fresh plant input	Decomposition		
		DPM	15.0000
		RPM	1.0000
		RPMc	1.0000
		RPMf	0.0305
AC3 Aggregate Type		RPMc within AC3	0.1500
		RPMf within AC3	0.1500
		DPMc within AC3	3.0000
		DPMf within AC3	1.5000
		BIO(AC1) within AC3	0.6000
		HUM(AC1) within AC3	0.0031
		BIO(AC2) within AC3	0.6000
		HUM(AC2) within AC3	0.0021
		RPMf(AC2) within AC3	0.1069
		DPMf(AC2) within AC3	1.5000
AC2 Aggregate Type		BIO(AC2)	0.6000
		HUM(AC2)	0.0051
		RPMf(AC2)	0.2069
		DPMf(AC2)	1.5000
AC2 Aggregate Type		BIO(AC1)	0.6000
		HUM(AC1)	0.5000

Proportional contribution of the components in aggregation				
	Macroaggregation			
		RPMc		0.2000
		DPMc		0.2000
		AC1		0.5000
		AC2		0.1000
	Microaggregation			
		RPMf within AC3		0.2340
		DPMf within AC3		0.0000
		AC1 within AC3		0.7660
	Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable			0.00180
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable			0.00180
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable			0.00180
	Fraction of the decomposition products (BIO and HUM) that goes to the respective BIO and HUM pool			
	RPMc and RPMf within AC3	to AC1 within AC3		0.9500
		to AC1		0.0500
AC1 within AC3		to AC1 within AC3		0.9500
		to AC1		0.0500
AC2 within AC3		to AC2 within AC3		0.9500
		to AC1 within AC3		0.0250
		to AC1		0.0250
AC2		to AC2		0.9500
		to AC1		0.0500
OTHER CALIBRATION PARAMETERS				
	Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)			
macro-aggregation		AC1		0.8000
macro-aggregation		AC2		2.5000
micro-aggregation		AC1 within AC3		0.1600
	Particle density of the mineral phase and the organic matter (g/cm3)			
		bd_m		2.2000
		bd_om		0.7000

3^η Ομάδα προσομοίωσης - Ασβεστόλιθοι

Input data

INPUT DATA							
# Year	# Month	PLANT	TEMPERATURE	PRECIPITATION	PAN EVAPORATION	COVER (1 if soil is covered with vegetation, 0 if not)	Total simulation time
1	1	0.3	10.8	141.6	68.1	1	60
	2	0.3	11.1	112.4	76.3	1	
	3	0.3	12.6	80.6	107.2	1	

	4	0.3	15.8	31.7	149.2	1
	5	0.3	20.0	13.0	211.3	1
	6	0.3	24.3	4.5	270.3	1
	7	0.3	26.3	1.2	295.9	1
	8	0.3	25.7	1.5	265.5	1
	9	0.3	23.0	18.7	189.5	1
	10	0.3	19.0	80.0	125.2	1
	11	0.3	15.6	72.8	84.9	1
	12	0.3	12.6	93.9	72.7	1
...	1	0.3	10.8	141.6	68.1	1
	2	0.3	11.1	112.4	76.3	1
	3	0.3	12.6	80.6	107.2	1
	4	0.3	15.8	31.7	149.2	1
	5	0.3	20.0	13.0	211.3	1
	6	0.3	24.3	4.5	270.3	1
	7	0.3	26.3	1.2	295.9	1
	8	0.3	25.7	1.5	265.5	1
	9	0.3	23.0	18.7	189.5	1
	10	0.3	19.0	80.0	125.2	1
	11	0.3	15.6	72.8	84.9	1
	12	0.3	12.6	93.9	72.7	1
60	1	0.3	10.8	141.6	68.1	1
	2	0.3	11.1	112.4	76.3	1
	3	0.3	12.6	80.6	107.2	1
	4	0.3	15.8	31.7	149.2	1
	5	0.3	20.0	13.0	211.3	1
	6	0.3	24.3	4.5	270.3	1
	7	0.3	26.3	1.2	295.9	1
	8	0.3	25.7	1.5	265.5	1
	9	0.3	23.0	18.7	189.5	1
	10	0.3	19.0	80.0	125.2	1
	11	0.3	15.6	72.8	84.9	1
	12	0.3	12.6	93.9	72.7	1

Input data parameters

Thickness of soil (in cm)	Bulk Density BD (kg/m3)	clay content (in %)	silt-clay (in %)	IOM (cell <u>comment</u> has intructions)	Total soil IOM (t/ha)	IOM_AC1 (t/ha)
10	1190	28.8	76.9	0	0	0

IOM_AC2 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	Total soil SOC for IOM calculation (t/ha)	Saturation capacity of silt-clay fraction (SC- SC) (cell <u>comment</u> has intructions)	SC-SC. The maximum concentration of the silt clay fraction in carbon (g C/g soil)
-------------------	-------------------------	-------------------------	--	---	--

0	0	0	0	0	55
---	---	---	---	---	----

MODEL PARAMETERS				OTHER MODEL PARAMETERS (these parameters should be left as default and be changed only if numerical errors happen)	
dpm_to_rpm_ratio (use 0.67 for shrubland and unimproved grassland, 0.25 for forest)	% (1-CO ₂) partitioning on BIO and HUM	Mass AC ₂ fraction	Mass AC ₃ fraction	limit for numerical errors	limit of C (t/ha) below which no aggregation or destruction takes place
0.7000	0.4495	0.25	0.75	0.000000000001	0.010

Initial Conditions

INITIAL CONDITIONS (t/ha)		
fresh plant input (t/ha)		
DPM		0.0000
RPM		0.0000
RPMc		0.0000
RPMf		0.0000
AC ₃ Aggregate type (t/ha)		
RPMc		3.9015
DPMc		0.6885
RPMf		0.0000
DPMf		0.0000
AC ₁ within AC ₃ (t/ha)		
BIO		1.2359
HUM		23.4814
AC ₂ within AC ₃ (t/ha)		
RPMf		0.6112
DPMf		0.6112
BIO		0.1854
HUM		3.5222
AC ₂ Aggregate type (t/ha)		
RPMf		0.5700
DPMf		0.5700
BIO		0.2046
HUM		3.8869
AC ₁ Aggregate type (t/ha)		
BIO		0.0765
HUM		1.4535
Initial distribution (%) of the silt clay mass in the aggregate types		
AC ₁		8.6500
AC ₂		17.6800
AC ₁ within AC ₃		66.3000

AC2 within AC3	7.3700
Fraction of sand mass in the aggregate types	
fsand_AC2	0.2500
fsand_AC3	0.7500

Calibration parameters

RATE CONSTANTS (1/y)			
		Fragmentation	
		RPM to RPMc	15.0000
		RPMc to RPMf	0.0000
		RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.1000
		DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	1.0000
		Macroaggregation	
		RPMc	0.6000
		DPMc	0.4700
		Microaggregation	
		k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000
		k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.0200
		Decomposition	
fresh plant input		DPM	10.4500
		RPM	5.5000
		RPMc	5.5000
		RPMf	5.5000
AC3 Aggregate Type		RPMc within AC3	0.1500
		RPMf within AC3	0.1500
		DPMc within AC3	3.0000
		DPMf within AC3	1.5000
		BIO(AC1) within AC3	0.6000
		HUM(AC1) within AC3	0.0031
		BIO(AC2) within AC3	0.6000
		HUM(AC2) within AC3	0.0021
		RPMf(AC2) within AC3	0.1069
		DPMf(AC2) within AC3	1.5000
AC2 Aggregate Type		BIO(AC2)	0.6000
		HUM(AC2)	0.0051
		RPMf(AC2)	0.2069
		DPMf(AC2)	1.5000
AC2 Aggregate Type		BIO(AC1)	0.6000
		HUM(AC1)	0.0051
Proportional contribution of the components in aggregation			
		Macroaggregation	
		RPMc	0.1000

		DPMc	0.2000
		AC1	0.6500
		AC2	0.0500
	Microaggregation		
		RPMf within AC3	0.2340
		DPMf within AC3	0.0000
		AC1 within AC3	0.7660
	Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable		0.00150
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable		0.00150
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable		0.00150
	Fraction of the decomposition products (BIO and HUM) that goes to the respective BIO and HUM pool		
RPMc and RPMf within AC3		to AC1 within AC3	0.9500
		to AC1	0.0500
AC1 within AC3		to AC1 within AC3	0.9500
		to AC1	0.0500
AC2 within AC3		to AC2 within AC3	0.9500
		to AC1 within AC3	0.0250
		to AC1	0.0250
AC2		to AC2	0.9500
		to AC1	0.0500
OTHER CALIBRATION PARAMETERS			
	Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)		
macro-aggregation		AC1	0.3000
macro-aggregation		AC2	2.0000
micro-aggregation		AC1 within AC3	1.0000
	Particle density of the mineral phase and the organic matter (g/cm³)		
		bd_m	2.2000
		bd_om	0.5000

MHAIA

Input data

INPUT DATA								
# Year	# Month	PLANT	TEMPERATURE	PRECIPITATION	PAN EVAPORATION	COVER (1 if soil is covered with vegetation, 0 if not)	TILLING (Please enter 1 if there is tilling; 0 if there is not)	Total simulation time
1	1	0.0	9.8	87.89	86.1	1	0	90
	2	0.0	11.3	44.91	99.0	1	0	
	3	0.0	13.4	70.93	114.7	1	0	

	4	4.0	16.0	15.06	133.6	0	1
	5	0.0	19.0	100	155.7	1	0
	6	0.0	22.7	110	177.0	1	0
	7	0.0	24.7	230	185.9	1	0
	8	0.0	23.5	300	169.1	1	0
	9	0.0	22.3	220	153.4	1	0
	10	4.0	19.0	100.14	125.6	0	1
	11	0.0	17.2	105.17	109.6	1	0
	12	0.0	12.9	110.46	92.0	1	0
...	1	0.0	9.8	87.89	86.1	1	0
	2	0.0	11.3	44.91	99.0	1	0
	3	0.0	13.4	70.93	114.7	1	0
	4	4.0	16.0	15.06	133.6	0	1
	5	0.0	19.0	100	155.7	1	0
	6	0.0	22.7	110	177.0	1	0
	7	0.0	24.7	230	185.9	1	0
	8	0.0	23.5	300	169.1	1	0
	9	0.0	22.3	220	153.4	1	0
	10	4.0	19.0	100.14	125.6	0	1
	11	0.0	17.2	105.17	109.6	1	0
	12	0.0	12.9	110.46	92.0	1	0
90	1	0.2	9.8	87.89	86.1	1	0
	2	0.2	11.3	44.91	99.0	1	0
	3	0.2	13.4	70.93	114.7	1	0
	4	0.2	16.0	15.06	133.6	1	0
	5	0.2	19.0	100	155.7	1	0
	6	0.2	22.7	110	177.0	1	0
	7	0.2	24.7	230	185.9	1	0
	8	0.2	23.5	300	169.1	1	0
	9	0.2	22.3	220	153.4	1	0
	10	0.2	19.0	100.14	125.6	1	0
	11	0.2	17.2	105.17	109.6	1	0
	12	0.2	12.9	110.46	92.0	1	0

Input data parameters

Thickness of soil (in cm)	Bulk Density BD (kg/m3)	clay content (in %)	silt-clay (in %)	IOM (cell <u>comment</u> has intructions)	Total soil IOM (t/ha)	IOM_AC1 (t/ha)
12	1004	3.3	34	0	2.72	0

IOM_AC2 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	IOM_AC2_inAC3 (t/ha)	Total soil SOC for IOM calculation (t/ha)	Saturation capacity of silt-clay fraction (SC-SC) (cell <u>comment</u> has intructions)	SC-SC. The maximum concentration of the silt clay fraction in carbon (g C/g soil)
-------------------	-------------------------	-------------------------	--	---	--

0	0	0	34	0	55000
---	---	---	----	---	-------

MODEL PARAMETERS				OTHER MODEL PARAMETERS (these parameters should be left as default and be changed only if numerical errors happen)	
dpm_to_rpm_ratio (use 0.67 for shrubland and unimproved grassland, 0.25 for forest)	%(1-CO ₂) partitioning on BIO and HUM	Mass AC2 fraction	Mass AC3 fraction	limit for numerical errors	limit of C (t/ha) below which no aggregation or destruction takes place
0.4300	0.4495	0.28	0.72	0.000000000001	0.010

Initial Conditions

INITIAL CONDITIONS (t/ha)			
fresh plant input (t/ha)			
DPM	0.0000	t/ha	
RPM	0.0000	t/ha	
RPMc	0.0000	t/ha	
RPMf	0.0000	t/ha	
AC3 Aggregate type (t/ha)			
RPMc	3.4000	t/ha	
DPMc	0.6000	t/ha	
RPMf	0.0000	t/ha	
DPMf	0.0000	t/ha	
AC1 within AC3 (t/ha)			
BIO	0.1650	t/ha	
HUM	3.1350	t/ha	
AC2 within AC3 (t/ha)			
RPMf	2.5000	t/ha	
DPMf	2.5000	t/ha	
BIO	0.1500	t/ha	
HUM	2.8500	t/ha	
AC2 Aggregate type (t/ha)			
RPMf	4.3500	t/ha	
DPMf	4.3500	t/ha	
BIO	0.2000	t/ha	
HUM	3.8000	t/ha	
AC1 Aggregate type (t/ha)			
BIO	0.2950	t/ha	
HUM	5.6050	t/ha	
Initial distribution (%) of the silt clay mass in the aggregate types			
AC1	36.0296	%	
AC2	25.5195	%	
AC1 within AC3	30.7607	%	
AC2 within AC3	7.6902	%	

Fraction of sand mass in the aggregate types			
	fsand_AC2	0.2860	fraction
	fsand_AC3	0.7140	fraction

Calibration parameters

RATE CONSTANTS (1/y)				
	Fragmentation			
		RPM to RPMc	50.0000	1/y
		RPMc to RPMf	0.0000	1/y
		RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.1000	1/y
		DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.5000	1/y
	Macroaggregation			
		RPMc	1.2000	1/y
		DPMc	0.8000	1/y
	Microaggregation			
		k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	2.0000	1/y
		k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	2.0000	1/y
	Decomposition			
fresh plant input		DPM	0.4000	1/y
		RPM	0.1000	1/y
		RPMc	0.1000	1/y
		RPMf	0.1000	1/y
AC3 Aggregate Type		RPMc within AC3	0.1000	1/y
		RPMf within AC3	0.1000	1/y
		DPMc within AC3	0.5000	1/y
		DPMf within AC3	0.5000	1/y
		BIO(AC1) within AC3	0.0600	1/y
		HUM(AC1) within AC3	0.0030	1/y
		BIO(AC2) within AC3	0.0600	1/y
		HUM(AC2) within AC3	0.0020	1/y
		RPMf(AC2) within AC3	0.1000	1/y
		DPMf(AC2) within AC3	0.1000	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC2)	0.0600	1/y
		HUM(AC2)	0.0020	1/y
		RPMf(AC2)	0.1000	1/y
		DPMf(AC2)	0.1000	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC1)	0.0600	1/y
		HUM(AC1)	0.0020	1/y
Proportional contribution of the components in aggregation				

Macroaggregation				
	RPMc	0.4500	fraction	
	DPMc	0.3800	fraction	
	AC1	0.0700	fraction	
	AC2	0.1000	fraction	
Microaggregation				
	RPMf within AC3	0.8000	fraction	
	DPMf within AC3	0.0000	fraction	
	AC1 within AC3	0.2000	fraction	
If there is no tilling	Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable	0.018	fraction	
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable	0.018	fraction	
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable	0.018	fraction	
	Fraction of the decomposition products (BIO and HUM) that goes to the respective BIO and HUM pool			
RPMc and RPMf within AC3	to AC1 within AC3	0.9500	fraction	
	to AC1	0.0500	fraction	
AC1 within AC3	to AC1 within AC3	0.9500	fraction	
	to AC1	0.0500	fraction	
AC2 within AC3	to AC2 within AC3	0.9500	fraction	
	to AC1 within AC3	0.0250	fraction	
	to AC1	0.0250	fraction	
AC2	to AC2	0.9500	fraction	
	to AC1	0.0500	fraction	
OTHER CALIBRATION PARAMETERS				
	Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)			
macro-aggregation	AC1	1.8000	fraction	
macro-aggregation	AC2	2.5000	fraction	
micro-aggregation	AC1 within AC3	0.4000	fraction	

If there is tilling	Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, ...	0.03	fraction	
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) ...	0.03	fraction	
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) ...	0.03	fraction	

Particle density of the mineral phase and the organic matter (g/cm3)			
bd_m	2.2000	g/cm3	
bd_om	0.7000	g/cm3	

Damma Glacier

1^η Περίοδος – Νέα εδάφη

Input data

INPUT DATA							
# Year	# Month	PLANT	TEMPERATURE	PRECIPITATION	PAN EVAPORATION	COVER (1 if soil is covered with vegetation, 0 if not)	Total simulation time
1	1	0.0060833	0.10	128.42	1.46	1	14
	2	0.0060833	0.10	130.77	3.02	1	
	3	0.0060833	0.10	139.42	10.53	1	
	4	0.0060833	0.10	159.19	18.59	1	
	5	0.0060833	5.00	192.62	21.01	1	
	6	0.0060833	8.07	174.51	21.62	1	
	7	0.0060833	15.02	153.04	59.19	1	
	8	0.0060833	11.80	178.44	58.65	1	
	9	0.0060833	7.62	178.72	32.46	1	
	10	0.0060833	0.40	161.65	12.63	1	
	11	0.0060833	0.10	170.19	2.09	1	
	12	0.0060833	0.10	131.34	1.40	1	
...	1	0.0060833	0.10	128.42	1.46	1	
	2	0.0060833	0.10	130.77	3.02	1	
	3	0.0060833	0.10	139.42	10.53	1	
	4	0.0060833	0.10	159.19	18.59	1	
	5	0.0060833	5.00	192.62	21.01	1	
	6	0.0060833	8.07	174.51	21.62	1	
	7	0.0060833	15.02	153.04	59.19	1	
	8	0.0060833	11.80	178.44	58.65	1	
	9	0.0060833	7.62	178.72	32.46	1	
	10	0.0060833	0.40	161.65	12.63	1	
	11	0.0060833	0.10	170.19	2.09	1	
	12	0.0060833	0.10	131.34	1.40	1	
14	1	0.0060833	0.10	128.42	1.46	1	
	2	0.0060833	0.10	130.77	3.02	1	
	3	0.0060833	0.10	139.42	10.53	1	
	4	0.0060833	0.10	159.19	18.59	1	
	5	0.0060833	5.00	192.62	21.01	1	
	6	0.0060833	8.07	174.51	21.62	1	

7	0.0060833	15.02	153.04	59.19	1
8	0.0060833	11.80	178.44	58.65	1
9	0.0060833	7.62	178.72	32.46	1
10	0.0060833	0.40	161.65	12.63	1
11	0.0060833	0.10	170.19	2.09	1
12	0.0060833	0.10	131.34	1.40	1

Input data parameters

Thickness of soil (in cm)	Bulk Density BD (kg/m3)	clay content (in %)	silt-clay (in %)	IOM (cell comment has intructions)	Total soil IOM (t/ha)	IOM_AC1 (t/ha)
10	1500	3.14	35	0	0	0

IOM_AC2 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	IOM_AC2_inAC3 (t/ha)	Total soil SOC for IOM calculation (t/ha)	Saturation capacity of silt-clay fraction (SC-SC) (cell comment has intructions)	SC-SC. The maximum concentration of the silt clay fraction in carbon (g C/g soil)
0	0	0	0	1	1000000

MODEL PARAMETERS					OTHER MODEL PARAMETERS (these parameters should be left as default and be changed only if numerical errors happen)	
dpm_to_rpm_ratio (use 0.67 for shrubland and unimproved grassland, 0.25 for forest)	%(1-CO2) partitioning on BIO and HUM	Mass AC2 fraction	Mass AC3 fraction		limit for numerical errors	limit of C (t/ha) below which no aggregation or destruction takes place
1.4400	0.4495	0.05	0.3		0.000000000001	0.000

Initial Conditions

INITIAL CONDITIONS (t/ha)			
fresh plant input (t/ha)			
DPM	0.000	t/ha	
RPM	0.000	t/ha	
RPMc	0.000	t/ha	
RPMf	0.000	t/ha	
AC3 Aggregate type (t/ha)			
RPMc	0.0077	t/ha	
DPMc	0.0026	t/ha	
RPMf	0.0022	t/ha	
DPMf	0.0022	t/ha	
AC1 within AC3 (t/ha)			
BIO	0.0110	t/ha	
HUM	0.0037	t/ha	

AC2 within AC3 (t/ha)			
	RPMf	0.0188	t/ha
	DPMf	0.0188	t/ha
	BIO	0.0094	t/ha
	HUM	0.0031	t/ha
AC2 Aggregate type (t/ha)			
	RPMf	0.0750	t/ha
	DPMf	0.0750	t/ha
	BIO	0.0807	t/ha
	HUM	0.0269	t/ha
AC1 Aggregate type (t/ha)			
	BIO	0.2006	t/ha
	HUM	0.0669	t/ha
Initial distribution (%) of the silt clay mass in the aggregate types			
	AC1	90.0000	%
	AC2	7.5000	%
	AC1 within AC3	1.2500	%
	AC2 within AC3	1.2500	%
Fraction of sand mass in the aggregate types			
	fsand_AC2	0.1000	fraction
	fsand_AC3	0.1000	fraction

Calibration parameters

RATE CONSTANTS (1/y)			
Fragmentation			
	RPM to RPMc	1.0000	1/y
	RPMc to RPMf	0.0001	1/y
	RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.0100	1/y
	DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.0100	1/y
Macroaggregation			
	RPMc	0.1000	1/y
	DPMc	0.1000	1/y
Microaggregation			
	k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y
	k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y
Decomposition			
fresh plant input	DPM	3.0000	1/y
	RPM	0.0050	1/y
	RPMc	0.0100	1/y
	RPMf	0.0100	1/y
AC3 Aggregate Type	RPMc within AC3	0.1000	1/y
	RPMf within AC3	0.1000	1/y
	DPMc within AC3	0.5000	1/y
	DPMf within AC3	0.2500	1/y

		BIO(AC1) within AC3	0.0100	1/y
		HUM(AC1) within AC3	0.0100	1/y
		BIO(AC2) within AC3	0.0100	1/y
		HUM(AC2) within AC3	0.0100	1/y
		RPMf(AC2) within AC3	0.1000	1/y
		DPMf(AC2) within AC3	0.5000	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC2)	0.0010	1/y
		HUM(AC2)	0.0051	1/y
		RPMf(AC2)	0.0010	1/y
		DPMf(AC2)	0.0050	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC1)	0.0010	1/y
		HUM(AC1)	0.0010	1/y
Proportional contribution of the components in aggregation				
	Macroaggregation			
		RPMc	0.3000	fraction
		DPMc	0.5500	fraction
		AC1	0.1000	fraction
		AC2	0.0500	fraction
	Microaggregation			
		RPMf within AC3	0.2000	fraction
		DPMf within AC3	0.7000	fraction
		AC1 within AC3	0.1000	fraction
	Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable		0.00001	fraction
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable		0.00001	fraction
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable		0.00001	fraction
	Fraction of the decomposition products (BIO and HUM) that goes to the respective BIO and HUM pool			
RPMc and RPMf within AC3		to AC1 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
AC1 within AC3		to AC1 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
AC2 within AC3		to AC2 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1 within AC3	0.0250	fraction
		to AC1	0.0250	fraction
AC2		to AC2	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
OTHER CALIBRATION PARAMETERS				
	Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)			
macro-aggregation		AC1	0.0001	fraction
macro-aggregation		AC2	0.0001	fraction
micro-aggregation		AC1 within AC3	0.0001	fraction

Particle density of the mineral phase and the organic matter (g/cm3)

bd_m 2.2000 g/cm3

bd_om 0.7000 g/cm3

2^η Περίοδος – Επαναπροώθηση παγετώνα

Input data

INPUT DATA							
# Year	# Month	PLANT	TEMPERATURE	PRECIPITATION	PAN EVAPORATION	COVER (1 if soil is covered with vegetation, 0 if not)	Total simulation time
1	1	0	0.10	50	5.00	1	23
	2	0	0.10	50	5.00	1	
	3	0	0.10	50	5.00	1	
	4	0	0.10	50	5.00	1	
	5	0	0.10	50	5.00	1	
	6	0	0.10	50	5.00	1	
	7	0	0.10	50	5.00	1	
	8	0	0.10	50	5.00	1	
	9	0	0.10	50	5.00	1	
	10	0	0.10	50	5.00	1	
	11	0	0.10	50	5.00	1	
	12	0	0.10	50	5.00	1	
...	1	0	0.10	50	5.00	1	
	2	0	0.10	50	5.00	1	
	3	0	0.10	50	5.00	1	
	4	0	0.10	50	5.00	1	
	5	0	0.10	50	5.00	1	
	6	0	0.10	50	5.00	1	
	7	0	0.10	50	5.00	1	
	8	0	0.10	50	5.00	1	
	9	0	0.10	50	5.00	1	
	10	0	0.10	50	5.00	1	
	11	0	0.10	50	5.00	1	
	12	0	0.10	50	5.00	1	
23	1	0	0.10	50	5.00	1	
	2	0	0.10	50	5.00	1	
	3	0	0.10	50	5.00	1	
	4	0	0.10	50	5.00	1	
	5	0	0.10	50	5.00	1	
	6	0	0.10	50	5.00	1	
	7	0	0.10	50	5.00	1	
	8	0	0.10	50	5.00	1	

9	0	0.10	50	5.00	1
10	0	0.10	50	5.00	1
11	0	0.10	50	5.00	1
12	0	0.10	50	5.00	1

Input data parameters

Thickness of soil (in cm)	Bulk Density BD (kg/m3)	clay content (in %)	silt-clay (in %)	IOM (cell <u>comment</u> has intructions)	Total soil IOM (t/ha)	IOM_AC1 (t/ha)
10	1500	3.14	35	0	0	0

IOM_AC2 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	IOM_AC2_inAC3 (t/ha)	Total soil SOC for IOM calculation (t/ha)	Saturation capacity of silt-clay fraction (SC-SC) (cell <u>comment</u> has intructions)	SC-SC. The maximum concentration of the silt clay fraction in carbon (g C/g soil)
0	0	0	0	1	1000000

MODEL PARAMETERS				OTHER MODEL PARAMETERS (these parameters should be left as default and be changed only if numerical errors happen)	
dpm_to_rpm_ratio (use 0.67 for shrubland and unimproved grassland, 0.25 for forest)	%(1-CO2) partitioning on BIO and HUM	Mass AC2 fraction	Mass AC3 fraction	limit for numerical errors	limit of C (t/ha) below which no aggregation or destruction takes place
1.4400	0.4495	0.05	0.3	0.000000000001	0.000

Initial conditions

INITIAL CONDITIONS (t/ha)		
fresh plant input (t/ha)		
DPM	0.040738	t/ha
RPM	0.088614	t/ha
RPMc	0.267394	t/ha
RPMf	5.52E-05	t/ha
AC3 Aggregate type (t/ha)		
RPMc	0.052641	t/ha
DPMc	0.008149	t/ha
RPMf	0.002242	t/ha
DPMf	0.000888	t/ha
AC1 within AC3 (t/ha)		
BIO	0.018477	t/ha
HUM	0.008426	t/ha
AC2 within AC3 (t/ha)		
RPMf	0.013016	t/ha

	DPMf	0.002593	t/ha
	BIO	0.012024	t/ha
	HUM	0.005512	t/ha
AC2 Aggregate type (t/ha)			
	RPMf	0.0734	t/ha
	DPMf	0.0720	t/ha
	BIO	0.0792	t/ha
	HUM	0.0261	t/ha
AC1 Aggregate type (t/ha)			
	BIO	0.2337	t/ha
	HUM	0.1131	t/ha
Initial distribution (%) of the silt clay mass in the aggregate types			
	AC1	90.0000	%
	AC2	7.5000	%
	AC1 within AC3	1.2500	%
	AC2 within AC3	1.2500	%
Fraction of sand mass in the aggregate types			
	fsand_AC2	0.1000	fraction
	fsand_AC3	0.1000	fraction

Calibration parameters

RATE CONSTANTS (1/y)				
Fragmentation				
	RPM to RPMc	1.0000	1/y	
	RPMc to RPMf	0.0001	1/y	
	RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.0100	1/y	
	DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.0100	1/y	
Macroaggregation				
	RPMc	0.1000	1/y	
	DPMc	0.1000	1/y	
Microaggregation				
	k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y	
	k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y	
Decomposition				
fresh plant input	DPM	3.0000	1/y	
	RPM	0.0050	1/y	
	RPMc	0.0100	1/y	
	RPMf	0.0100	1/y	
AC3 Aggregate Type	RPMc within AC3	0.1000	1/y	
	RPMf within AC3	0.1000	1/y	
	DPMc within AC3	0.5000	1/y	
	DPMf within AC3	0.2500	1/y	
	BIO(AC1) within AC3	0.0100	1/y	

		HUM(AC1) within AC3	0.0100	1/y
		BIO(AC2) within AC3	0.0100	1/y
		HUM(AC2) within AC3	0.0100	1/y
		RPMf(AC2) within AC3	0.1000	1/y
		DPMf(AC2) within AC3	0.5000	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC2)	0.0010	1/y
		HUM(AC2)	0.0051	1/y
		RPMf(AC2)	0.0010	1/y
		DPMf(AC2)	0.0050	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC1)	0.0010	1/y
		HUM(AC1)	0.0010	1/y
Proportional contribution of the components in aggregation				
	Macroaggregation			
		RPMc	0.3000	fraction
		DPMc	0.5500	fraction
		AC1	0.1000	fraction
		AC2	0.0500	fraction
	Microaggregation			
		RPMf within AC3	0.2000	fraction
		DPMf within AC3	0.7000	fraction
		AC1 within AC3	0.1000	fraction
		Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable	0.00001	fraction
		Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00001	fraction
		Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00001	fraction
		Fraction of the decomposition products (BIO and HUM) that goes to the respective BIO and HUM pool		
RPMc and RPMf within AC3		to AC1 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
AC1 within AC3		to AC1 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
AC2 within AC3		to AC2 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1 within AC3	0.0250	fraction
		to AC1	0.0250	fraction
AC2		to AC2	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
OTHER CALIBRATION PARAMETERS				
	Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)			
macro-aggregation		AC1	0.0001	fraction
macro-aggregation		AC2	0.0001	fraction
micro-aggregation		AC1 within AC3	0.0001	fraction
	Particle density of the mineral phase and the organic matter (g/cm3)			
		bd_m	2.2000	g/cm3

3^η Περίοδος – Εδάφη ενδιάμεσης ηλικίας

Input data

INPUT DATA							
# Year	# Month	PLANT	TEMPERATURE	PRECIPITATION	PAN EVAPORATION	COVER (1 if soil is covered with vegetation, 0 if not)	Total simulation time
1	1	0.008333	0.10	128.42	1.46	1	44
	2	0.008333	0.10	130.77	3.02	1	
	3	0.008333	0.10	139.42	10.53	1	
	4	0.008333	0.10	159.19	18.59	1	
	5	0.008333	0.10	192.62	21.01	1	
	6	0.008333	6.46	174.51	21.62	1	
	7	0.008333	12.01	153.04	59.19	1	
	8	0.008333	9.44	178.44	58.65	1	
	9	0.008333	6.10	178.72	32.46	1	
	10	0.008333	0.34	161.65	12.63	1	
	11	0.008333	0.10	170.19	2.09	1	
	12	0.008333	0.10	131.34	1.40	1	
...	1	0.056583	0.10	128.42	1.46	1	
	2	0.056583	0.10	130.77	3.02	1	
	3	0.056583	0.10	139.42	10.53	1	
	4	0.056583	0.10	159.19	18.59	1	
	5	0.056583	0.10	192.62	21.01	1	
	6	0.056583	6.46	174.51	21.62	1	
	7	0.056583	12.01	153.04	59.19	1	
	8	0.056583	9.44	178.44	58.65	1	
	9	0.056583	6.10	178.72	32.46	1	
	10	0.056583	0.34	161.65	12.63	1	
	11	0.056583	0.10	170.19	2.09	1	
	12	0.056583	0.10	131.34	1.40	1	
...	1	0.116667	0.10	128.42	1.46	1	
	2	0.116667	0.10	130.77	3.02	1	
	3	0.116667	0.10	139.42	10.53	1	
	4	0.116667	0.10	159.19	18.59	1	
	5	0.116667	0.10	192.62	21.01	1	
	6	0.116667	6.46	174.51	21.62	1	
	7	0.116667	12.01	153.04	59.19	1	
	8	0.116667	9.44	178.44	58.65	1	
	9	0.116667	6.10	178.72	32.46	1	
	10	0.116667	0.34	161.65	12.63	1	

44	11	0.116667	0.10	170.19	2.09	1
	12	0.116667	0.10	131.34	1.40	1
	1	0.15	0.10	128.42	1.46	1
	2	0.15	0.10	130.77	3.02	1
	3	0.15	0.10	139.42	10.53	1
	4	0.15	0.10	159.19	18.59	1
	5	0.15	0.10	192.62	21.01	1
	6	0.15	6.46	174.51	21.62	1
	7	0.15	12.01	153.04	59.19	1
	8	0.15	9.44	178.44	58.65	1
	9	0.15	6.10	178.72	32.46	1
	10	0.15	0.34	161.65	12.63	1
	11	0.15	0.10	170.19	2.09	1
	12	0.15	0.10	131.34	1.40	1

Input data parameters

Thickness of soil (in cm)	Bulk Density BD (kg/m3)	clay content (in %)	silt-clay (in %)	IOM (cell <u>comment</u> has intructions)	Total soil IOM (t/ha)	IOM_AC1 (t/ha)
10	1500	3.14	35	0	0	0

IOM_AC2 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	IOM_AC2_inAC3 (t/ha)	Total soil SOC for IOM calculation (t/ha)	Saturation capacity of silt-clay fraction (SC-SC) (cell <u>comment</u> has intructions)	SC-SC. The maximum concentration of the silt clay fraction in carbon (g C/g soil)
0	0	0	0	1	1000000

MODEL PARAMETERS				OTHER MODEL PARAMETERS (these parameters should be left as default and be changed only if numerical errors happen)	
dpm_to_rpm_ratio (use 0.67 for shrubland and unimproved grassland, 0.25 for forest)	%(1-CO2) partitioning on BIO and HUM	Mass AC2 fraction	Mass AC3 fraction	limit for numerical errors	limit of C (t/ha) below which no aggregation or destruction takes place
1.4400	0.4495	0.1	0.4	0.000000000001	0.000

Initial conditions

INITIAL CONDITIONS (t/ha)			
fresh plant input (t/ha)			
DPM	6.56E-05	t/ha	
RPM	0.011016	t/ha	
RPMc	0.279254	t/ha	
RPMf	0.000115	t/ha	

AC3 Aggregate type (t/ha)			
	RPMc	0.09497	t/ha
	DPMc	0.003377	t/ha
	RPMf	0.003234	t/ha
	DPMf	0.000618	t/ha
AC1 within AC3 (t/ha)			
	BIO	0.024419	t/ha
	HUM	0.012529	t/ha
AC2 within AC3 (t/ha)			
	RPMf	0.011521	t/ha
	DPMf	0.00155	t/ha
	BIO	0.013236	t/ha
	HUM	0.006184	t/ha
AC2 Aggregate type (t/ha)			
	RPMf	0.0722	t/ha
	DPMf	0.0703	t/ha
	BIO	0.0780	t/ha
	HUM	0.0255	t/ha
AC1 Aggregate type (t/ha)			
	BIO	0.2319	t/ha
	HUM	0.1148	t/ha
Initial distribution (%) of the silt clay mass in the aggregate types			
	AC1	85.0000	%
	AC2	10.0000	%
	AC1 within AC3	2.5000	%
	AC2 within AC3	2.5000	%
Fraction of sand mass in the aggregate types			
	fsand_AC2	0.1000	fraction
	fsand_AC3	0.4500	fraction

Calibration parameters

RATE CONSTANTS (1/y)			
Fragmentation			
	RPM to RPMc	20.0000	1/y
	RPMc to RPMf	0.0010	1/y
	RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.1000	1/y
	DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.5000	1/y
Macroaggregation			
	RPMc	0.1000	1/y
	DPMc	0.1000	1/y
Microaggregation			
	k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y
	k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y
Decomposition			
fresh plant input	DPM	7.0000	1/y

		RPM	0.1000	1/y
		RPMc	0.1000	1/y
		RPMf	0.1000	1/y
AC3 Aggregate Type		RPMc within AC3	0.1000	1/y
		RPMf within AC3	0.1000	1/y
		DPMc within AC3	0.5000	1/y
		DPMf within AC3	0.2500	1/y
		BIO(AC1) within AC3	0.0100	1/y
		HUM(AC1) within AC3	0.0100	1/y
		BIO(AC2) within AC3	0.0100	1/y
		HUM(AC2) within AC3	0.0100	1/y
		RPMf(AC2) within AC3	0.1000	1/y
		DPMf(AC2) within AC3	0.5000	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC2)	0.0001	1/y
		HUM(AC2)	0.0005	1/y
		RPMf(AC2)	0.0010	1/y
		DPMf(AC2)	0.0005	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC1)	0.0100	1/y
		HUM(AC1)	0.0100	1/y
Proportional contribution of the components in aggregation				
	Macroaggregation			
		RPMc	0.35	fraction
		DPMc	0.5	fraction
		AC1	0.1	fraction
		AC2	0.05	fraction
	Microaggregation			
		RPMf within AC3	0.2000	fraction
		DPMf within AC3	0.7000	fraction
		AC1 within AC3	0.1000	fraction
	Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable			0.00001 fraction
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable			0.00001 fraction
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable			0.00001 fraction
	Fraction of the decomposition products (BIO and HUM) that goes to the respective BIO and HUM pool			
RPMc and RPMf within AC3		to AC1 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
AC1 within AC3		to AC1 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
AC2 within AC3		to AC2 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1 within AC3	0.0250	fraction
		to AC1	0.0250	fraction
AC2		to AC2	0.9500	fraction

				to AC1	0.0500	fraction	
OTHER CALIBRATION PARAMETERS							
	Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)						
macro-aggregation					AC1	0.0001	fraction
macro-aggregation					AC2	0.0001	fraction
micro-aggregation					AC1 within AC3	0.0001	fraction
	Particle density of the mineral phase and the organic matter (g/cm3)						
					bd_m	2.2000	g/cm3
					bd_om	0.7000	g/cm3

4^η Περίοδος – Επαναπροώθηση παγετώνα

Input data

INPUT DATA							
# Year	# Month	PLANT	TEMPERATURE	PRECIPITATION	PAN EVAPORATION	COVER (1 if soil is covered with vegetation, 0 if not)	Total simulation time
1	1	0.0166667	0.10	50	5.00	1	14
	2	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	3	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	4	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	5	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	6	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	7	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	8	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	9	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	10	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	11	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	12	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
...	1	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	2	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	3	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	4	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	5	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	6	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	7	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	8	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	9	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	10	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	11	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
	12	0.0166667	0.10	50	5.00	1	
3	1	0.0166667	0.10	50	5.00	1	

2	0.0166667	0.10	50	5.00	1
3	0.0166667	0.10	50	5.00	1
4	0.0166667	0.10	50	5.00	1
5	0.0166667	0.10	50	5.00	1
6	0.0166667	0.10	50	5.00	1
7	0.0166667	0.10	50	5.00	1
8	0.0166667	0.10	50	5.00	1
9	0.0166667	0.10	50	5.00	1
10	0.0166667	0.10	50	5.00	1
11	0.0166667	0.10	50	5.00	1
12	0.0166667	0.10	50	5.00	1

Input data parameters

Thickness of soil (in cm)	Bulk Density BD (kg/m3)	clay content (in %)	silt-clay (in %)	IOM (cell <u>comment</u> has intructions)	Total soil IOM (t/ha)	IOM_AC1 (t/ha)
10	1300	3.14	35	0	0	0

IOM_AC2 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	IOM_AC2_inAC3 (t/ha)	Total soil SOC for IOM calculation (t/ha)	Saturation capacity of silt-clay fraction (SC-SC) (cell <u>comment</u> has intructions)	SC-SC. The maximum concentration of the silt clay fraction in carbon (g C/g soil)
0	0	0	0	1	1000000

MODEL PARAMETERS				OTHER MODEL PARAMETERS (these parameters should be left as default and be changed only if numerical errors happen)	
dpm_to_rpm_ratio (use 0.67 for shrubland and unimproved grassland, 0.25 for forest)	%(1-CO2) partitioning on BIO and HUM	Mass AC2 fraction	Mass AC3 fraction	limit for numerical errors	limit of C (t/ha) below which no aggregation or destruction takes place
1.4400	0.4495	0.1	0.4	0.000000000001	0.000

Initial conditions

INITIAL CONDITIONS (t/ha)		
fresh plant input (t/ha)		
DPM	0.579982	t/ha
RPM	0.172259	t/ha
RPMc	8.294478	t/ha
RPMf	0.019869	t/ha
AC3 Aggregate type (t/ha)		
RPMc	1.376515	t/ha
DPMc	0.043976	t/ha

	RPMf	0.252275	t/ha
	DPMf	0.049845	t/ha
AC1 within AC3 (t/ha)			
	BIO	0.202141	t/ha
	HUM	0.202503	t/ha
AC2 within AC3 (t/ha)			
	RPMf	0.141361	t/ha
	DPMf	0.028275	t/ha
	BIO	0.070976	t/ha
	HUM	0.034847	t/ha
AC2 Aggregate type (t/ha)			
	RPMf	0.0292	t/ha
	DPMf	0.0286	t/ha
	BIO	0.0319	t/ha
	HUM	0.0104	t/ha
AC1 Aggregate type (t/ha)			
	BIO	1.5160	t/ha
	HUM	1.7370	t/ha
Initial distribution (%) of the silt clay mass in the aggregate types			
	AC1	85.0000	%
	AC2	10.0000	%
	AC1 within AC3	2.5000	%
	AC2 within AC3	2.5000	%
Fraction of sand mass in the aggregate types			
	fsand_AC2	0.1000	fraction
	fsand_AC3	0.4500	fraction

Calibration parameters

RATE CONSTANTS (1/y)			
Fragmentation			
	RPM to RPMc	16.0000	1/y
	RPMc to RPMf	0.0010	1/y
	RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.1000	1/y
	DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.5000	1/y
Macroaggregation			
	RPMc	0.1000	1/y
	DPMc	0.5000	1/y
Microaggregation			
	k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y
	k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y
Decomposition			
fresh plant input	DPM	7.0000	1/y
	RPM	0.3000	1/y
	RPMc	0.3000	1/y
	RPMf	0.3000	1/y

AC3 Aggregate Type	RPMc within AC3	0.0001	1/y
	RPMf within AC3	0.0001	1/y
	DPMc within AC3	0.0005	1/y
	DPMf within AC3	0.0003	1/y
	BIO(AC1) within AC3	0.0000	1/y
	HUM(AC1) within AC3	0.0000	1/y
	BIO(AC2) within AC3	0.0000	1/y
	HUM(AC2) within AC3	0.0000	1/y
	RPMf(AC2) within AC3	0.0010	1/y
	DPMf(AC2) within AC3	0.0050	1/y
AC2 Aggregate Type	BIO(AC2)	0.0000	1/y
	HUM(AC2)	0.0005	1/y
	RPMf(AC2)	0.0010	1/y
	DPMf(AC2)	0.0005	1/y
AC2 Aggregate Type	BIO(AC1)	0.0001	1/y
	HUM(AC1)	0.0001	1/y
Proportional contribution of the components in aggregation			
Macroaggregation			
	RPMc	0.35	fraction
	DPMc	0.5	fraction
	AC1	0.1	fraction
	AC2	0.05	fraction
Microaggregation			
	RPMf within AC3	0.2000	fraction
	DPMf within AC3	0.7000	fraction
	AC1 within AC3	0.1000	fraction
	Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable	0.00001	fraction
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00001	fraction
	Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00001	fraction
	Fraction of the decomposition products (BIO and HUM) that goes to the respective BIO and HUM pool		
RPMc and RPMf within AC3	to AC1 within AC3	0.9500	fraction
	to AC1	0.0500	fraction
AC1 within AC3	to AC1 within AC3	0.9500	fraction
	to AC1	0.0500	fraction
AC2 within AC3	to AC2 within AC3	0.9500	fraction
	to AC1 within AC3	0.0250	fraction
AC2	to AC1	0.0250	fraction
	to AC2	0.9500	fraction
	to AC1	0.0500	fraction
OTHER CALIBRATION PARAMETERS			
	Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)		

macro-aggregation	AC1	0.0001	fraction
macro-aggregation	AC2	0.0001	fraction
micro-aggregation	AC1 within AC3	0.0001	fraction
Particle density of the mineral phase and the organic matter (g/cm3)			
	bd_m	2.2000	g/cm3
	bd_om	0.7000	g/cm3

5^η Περίοδος

Input data

INPUT DATA							
# Year	# Month	PLANT	TEMPERATURE	PRECIPITATION	PAN EVAPORATION	COVER (1 if soil is covered with vegetation, 0 if not)	Total simulation time
1	1	0.0166667	0.10	128.42	1.46	1	40
	2	0.0166667	0.10	130.77	3.02	1	
	3	0.0166667	0.10	139.42	10.53	1	
	4	0.0166667	0.10	159.19	18.59	1	
	5	0.0166667	0.10	192.62	21.01	1	
	6	0.0166667	6.05	174.51	21.62	1	
	7	0.0166667	11.26	153.04	59.19	1	
	8	0.0166667	8.85	178.44	58.65	1	
	9	0.0166667	5.72	178.72	32.46	1	
	10	0.0166667	0.30	161.65	12.63	1	
	11	0.0166667	0.10	170.19	2.09	1	
	12	0.0166667	0.10	131.34	1.40	1	
...	1	0.0416667	0.10	128.42	1.46	1	
	2	0.0416667	0.10	130.77	3.02	1	
	3	0.0416667	0.10	139.42	10.53	1	
	4	0.0416667	0.10	159.19	18.59	1	
	5	0.0416667	0.10	192.62	21.01	1	
	6	0.0416667	6.05	174.51	21.62	1	
	7	0.0416667	11.26	153.04	59.19	1	
	8	0.0416667	8.85	178.44	58.65	1	
	9	0.0416667	5.72	178.72	32.46	1	
	10	0.0416667	0.30	161.65	12.63	1	
	11	0.0416667	0.10	170.19	2.09	1	
	12	0.0416667	0.10	131.34	1.40	1	
40	1	0.0416667	0.10	128.42	1.46	1	
	1	0.1666667	0.10	128.42	1.46	1	
	2	0.1666667	0.10	130.77	3.02	1	
	3	0.1666667	0.10	139.42	10.53	1	
	4	0.1666667	0.10	159.19	18.59	1	
	5	0.1666667	0.10	192.62	21.01	1	

6	0.1666667	6.05	174.51	21.62	1
7	0.1666667	11.26	153.04	59.19	1
8	0.1666667	8.85	178.44	58.65	1
9	0.1666667	5.72	178.72	32.46	1
10	0.1666667	0.30	161.65	12.63	1
11	0.1666667	0.10	170.19	2.09	1
12	0.1666667	0.10	131.34	1.40	1

Input data parameters

Thickness of soil (in cm)	Bulk Density BD (kg/m3)	clay content (in %)	silt-clay (in %)	IOM (cell <u>comment</u> has intructions)	Total soil IOM (t/ha)	IOM_AC1 (t/ha)
10	1000	3.14	35	0	0	0

IOM_AC2 (t/ha)	IOM_AC1_inAC3 (t/ha)	IOM_AC2_inAC3 (t/ha)	Total soil SOC for IOM calculation (t/ha)	Saturation capacity of silt-clay fraction (SC-SC) (cell <u>comment</u> has intructions)	SC-SC. The maximum concentration of the silt clay fraction in carbon (g C/g soil)
0	0	0	0	1	1000000

MODEL PARAMETERS					OTHER MODEL PARAMETERS (these parameters should be left as default and be changed only if numerical errors happen)	
dpm_to_rpm_ratio (use 0.67 for shrubland and unimproved grassland, 0.25 for forest)	% (1-CO2) partitioning on BIO and HUM	Mass AC2 fraction	Mass AC3 fraction		limit for numerical errors	limit of C (t/ha) below which no aggregation or destruction takes place
1.4400	0.4495	0.1	0.4		0.000000000001	0.000

Initial conditions

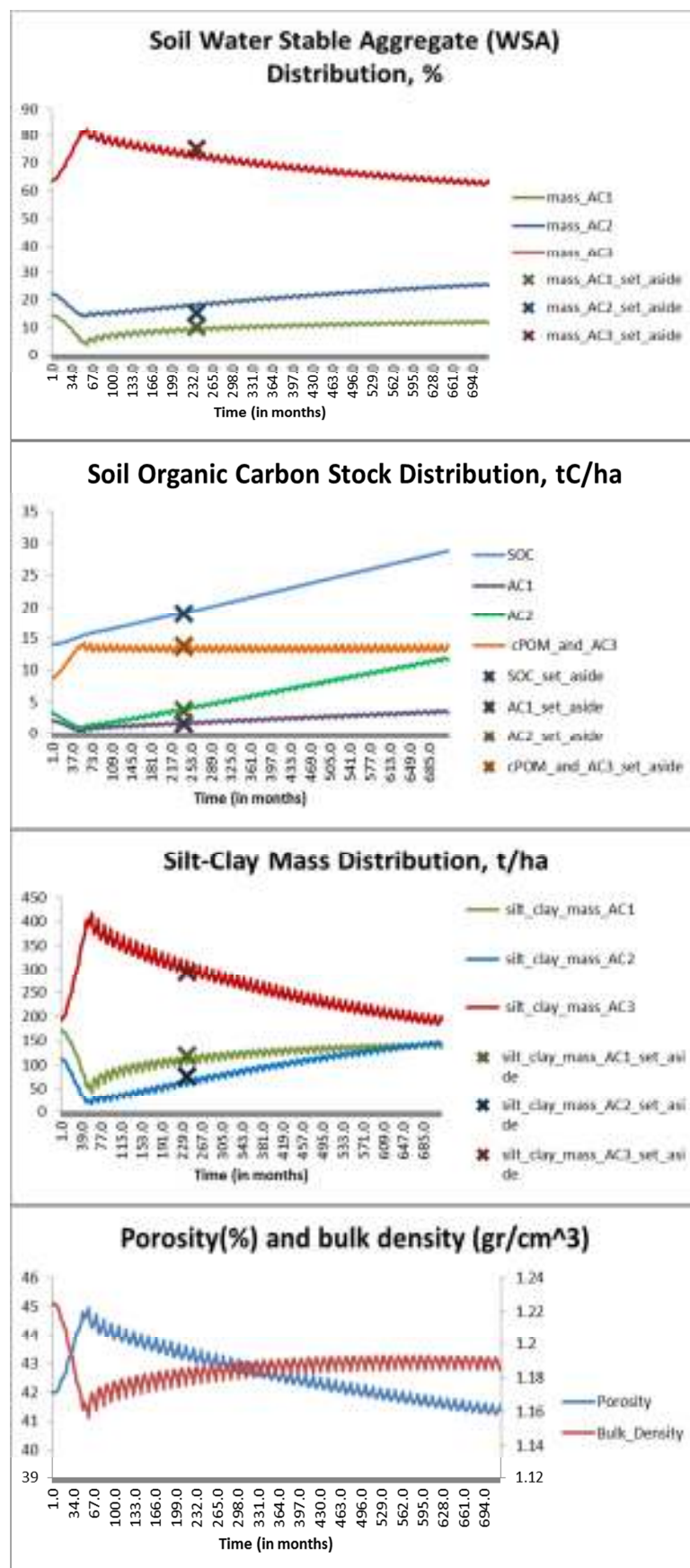
INITIAL CONDITIONS (t/ha)			
fresh plant input (t/ha)			
DPM	0.18212	t/ha	
RPM	0.052404	t/ha	
RPMc	6.686443	t/ha	
RPMf	0.021413	t/ha	
AC3 Aggregate type (t/ha)			
RPMc	1.218566	t/ha	
DPMc	0.02455	t/ha	
RPMf	0.340394	t/ha	
DPMf	0.057542	t/ha	
AC1 within AC3 (t/ha)			
BIO	0.197639	t/ha	
HUM	0.198062	t/ha	
AC2 within AC3 (t/ha)			

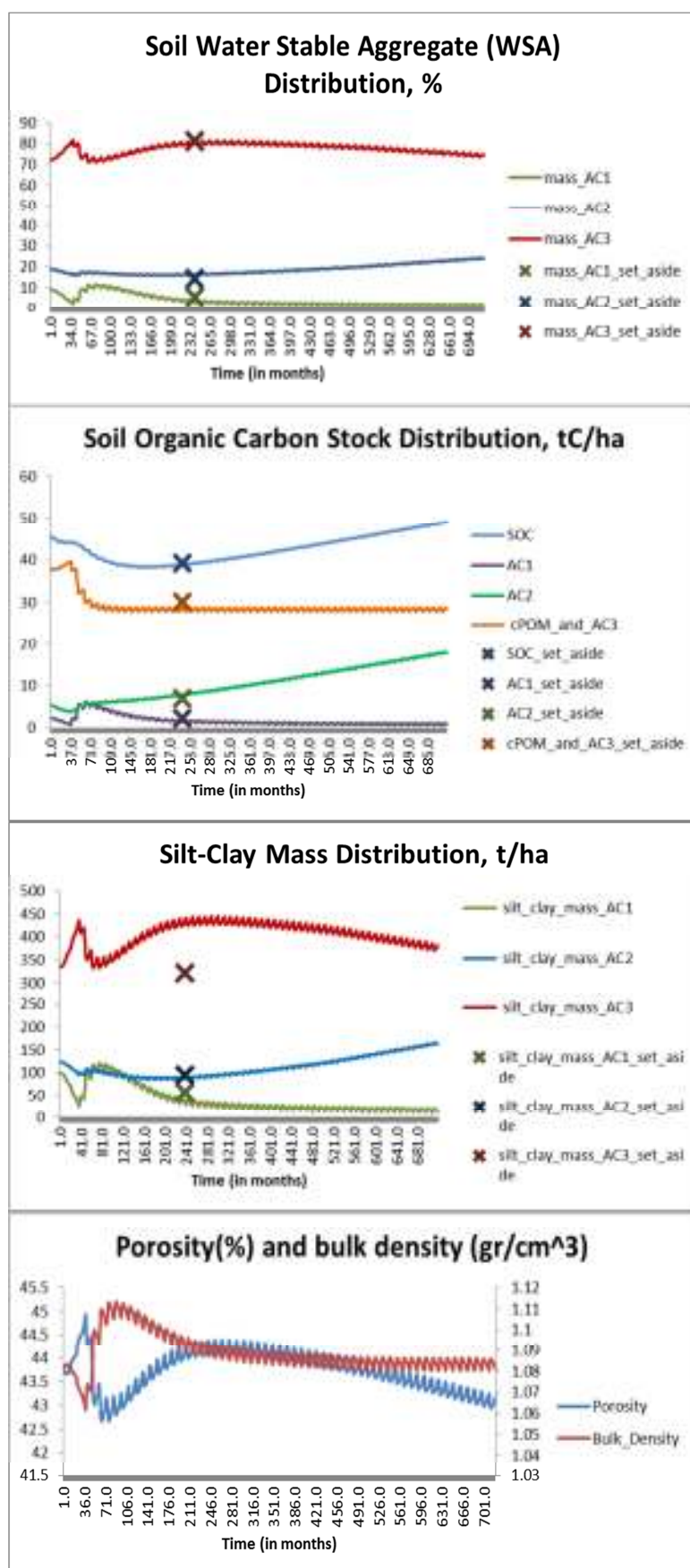
	RPMf	0.217152	t/ha
	DPMf	0.042097	t/ha
	BIO	0.076146	t/ha
	HUM	0.039929	t/ha
AC2 Aggregate type (t/ha)			
	RPMf	0.028996	t/ha
	DPMf	0.02841	t/ha
	BIO	0.031711	t/ha
	HUM	0.010378	t/ha
AC1 Aggregate type (t/ha)			
	BIO	1.873085	t/ha
	HUM	2.174292	t/ha
Initial distribution (%) of the silt clay mass in the aggregate types			
	AC1	75.0000	%
	AC2	15.0000	%
	AC1 within AC3	5.0000	%
	AC2 within AC3	5.0000	%
Fraction of sand mass in the aggregate types			
	fsand_AC2	0.1500	fraction
	fsand_AC3	0.5000	fraction

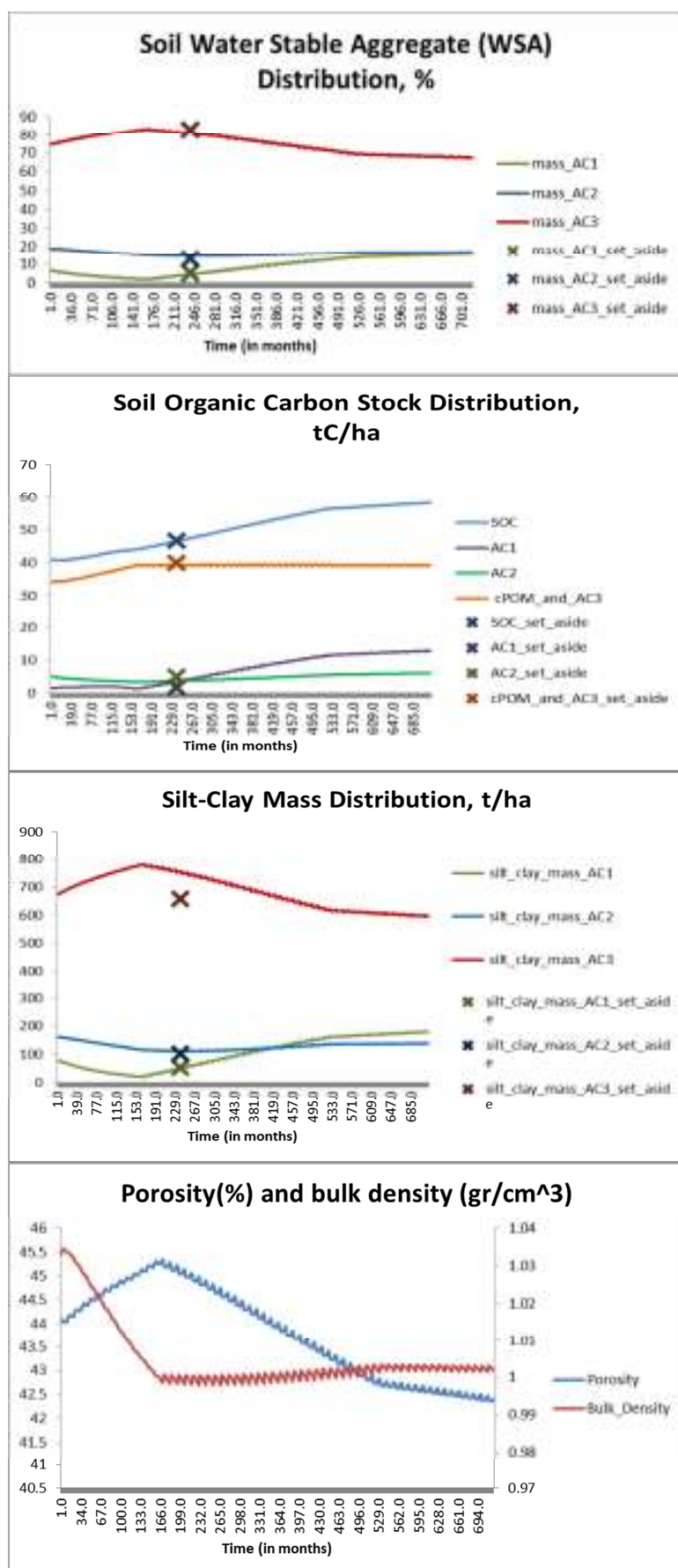
Calibration parameters

RATE CONSTANTS (1/y)			
Fragmentation			
	RPM to RPMc	14.0000	1/y
	RPMc to RPMf	0.0010	1/y
	RPMc(AC3) to RPMf(AC3)	0.1000	1/y
	DPMc(AC3) to DPMf(AC3)	0.5000	1/y
Macroaggregation			
	RPMc	0.1000	1/y
	DPMc	0.5000	1/y
Microaggregation			
	k_RPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y
	k_DPMf_AC2_in_AC3_ag_ini	0.2000	1/y
Decomposition			
fresh plant input	DPM	10.0000	1/y
	RPM	0.2000	1/y
	RPMc	0.2000	1/y
	RPMf	0.2000	1/y
AC3 Aggregate Type	RPMc within AC3	0.0001	1/y
	RPMf within AC3	0.0001	1/y
	DPMc within AC3	0.0005	1/y
	DPMf within AC3	0.0003	1/y
	BIO(AC1) within AC3	0.1000	1/y
	HUM(AC1) within AC3	0.1000	1/y

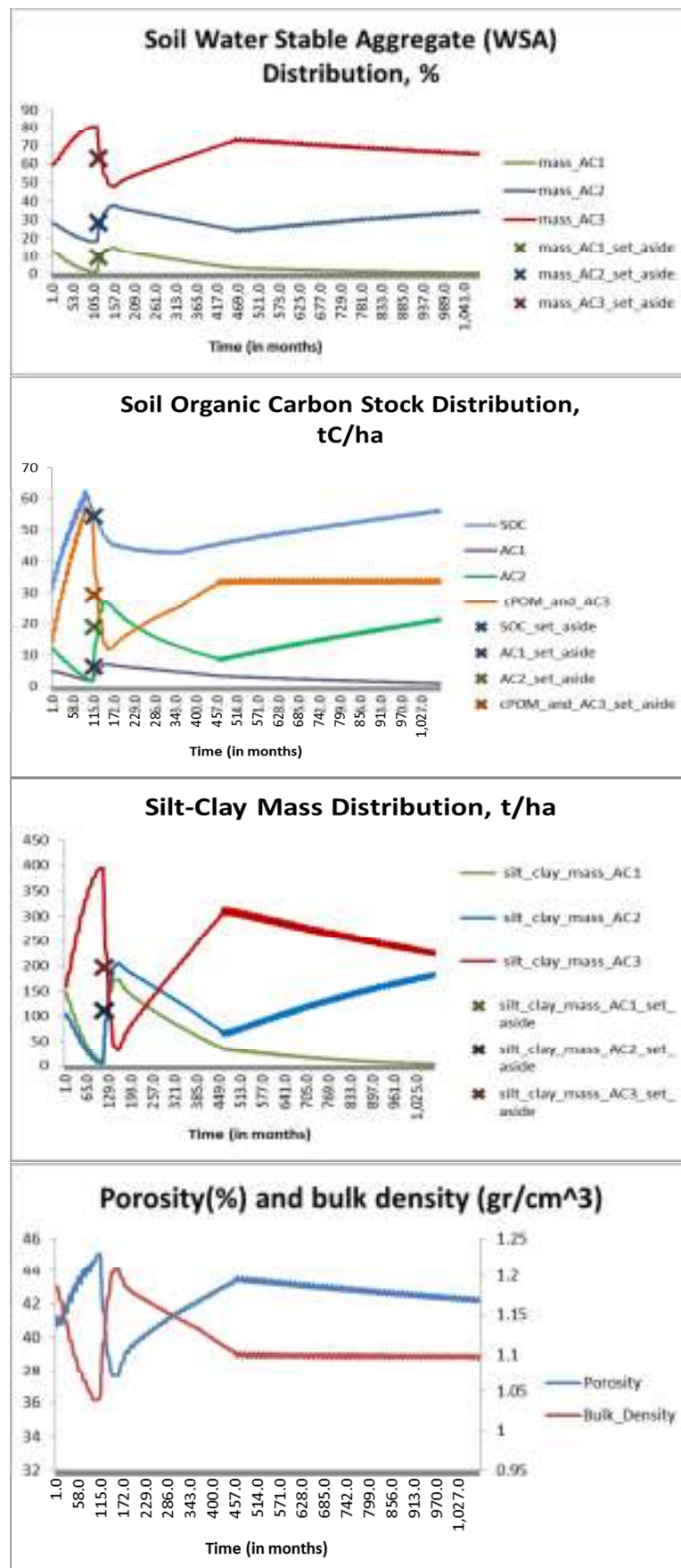
		BIO(AC2) within AC3	0.1000	1/y
		HUM(AC2) within AC3	0.1000	1/y
		RPMf(AC2) within AC3	0.0010	1/y
		DPMf(AC2) within AC3	0.0050	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC2)	0.1000	1/y
		HUM(AC2)	0.1000	1/y
		RPMf(AC2)	0.0100	1/y
		DPMf(AC2)	0.0050	1/y
AC2 Aggregate Type		BIO(AC1)	0.2500	1/y
		HUM(AC1)	0.2500	1/y
Proportional contribution of the components in aggregation				
	Macroaggregation			
		RPMc	0.35	fraction
		DPMc	0.5	fraction
		AC1	0.1	fraction
		AC2	0.05	fraction
	Microaggregation			
		RPMf within AC3	0.2000	fraction
		DPMf within AC3	0.7000	fraction
		AC1 within AC3	0.1000	fraction
		Fraction of the fDPM+cDPM within AC3 aggregate to the AC3 aggregate type, below which macro-aggregates are considered unstable	0.00001	fraction
		Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2 within AC3) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00001	fraction
		Fraction of the fDPM+cDPM within micro-aggregates (AC2) below which macro-aggregates are considered unstable	0.00001	fraction
		Fraction of the decomposition products (BIO and HUM) that goes to the respective BIO and HUM pool		
RPMc and RPMf within AC3		to AC1 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
AC1 within AC3		to AC1 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
AC2 within AC3		to AC2 within AC3	0.9500	fraction
		to AC1 within AC3	0.0250	fraction
		to AC1	0.0250	fraction
AC2		to AC2	0.9500	fraction
		to AC1	0.0500	fraction
OTHER CALIBRATION PARAMETERS				
	Correction factor for silt-clay mass flow (fraction)			
macro-aggregation		AC1	0.0001	fraction
macro-aggregation		AC2	0.0001	fraction
micro-aggregation		AC1 within AC3	0.0001	fraction
	Particle density of the mineral phase and the organic matter (g/cm3)			
		bd_m	2.2000	g/cm3
		bd_om	0.7000	g/cm3

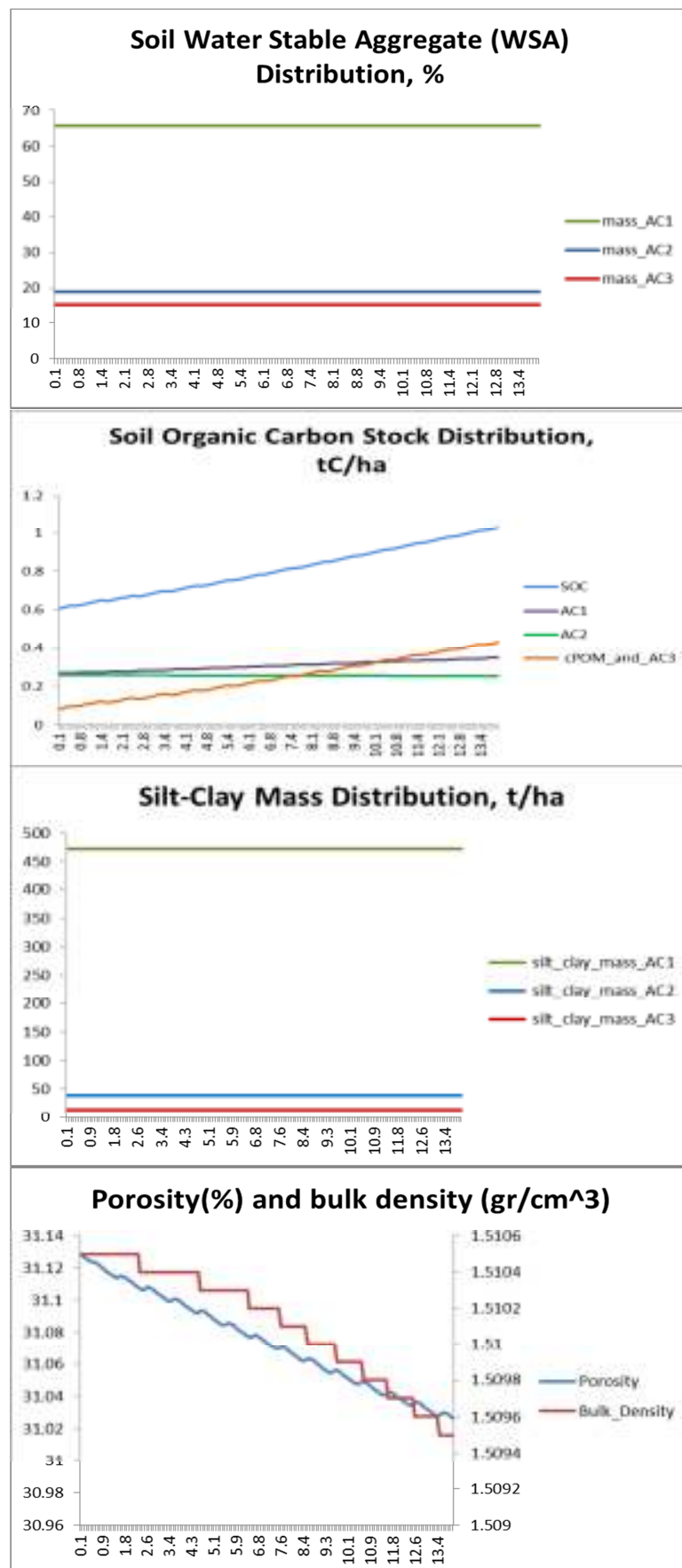


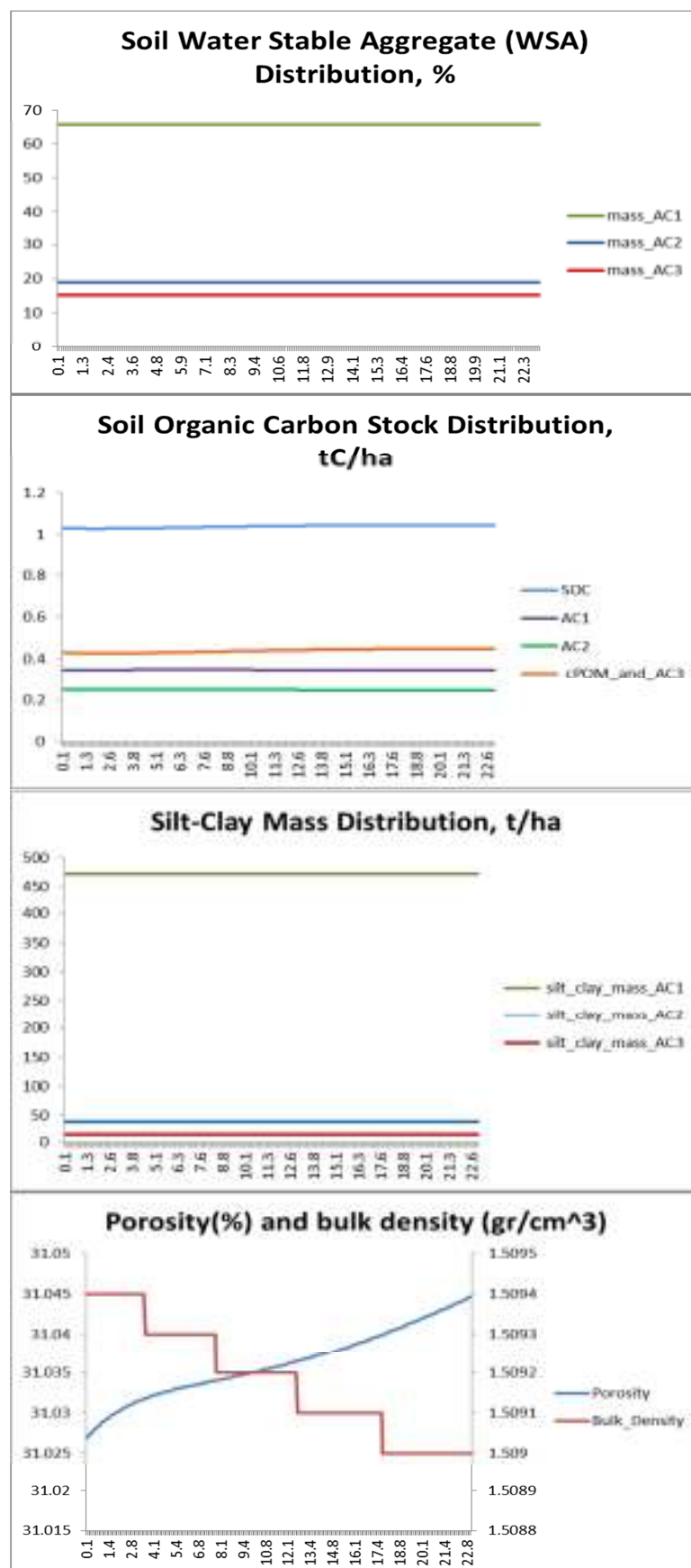


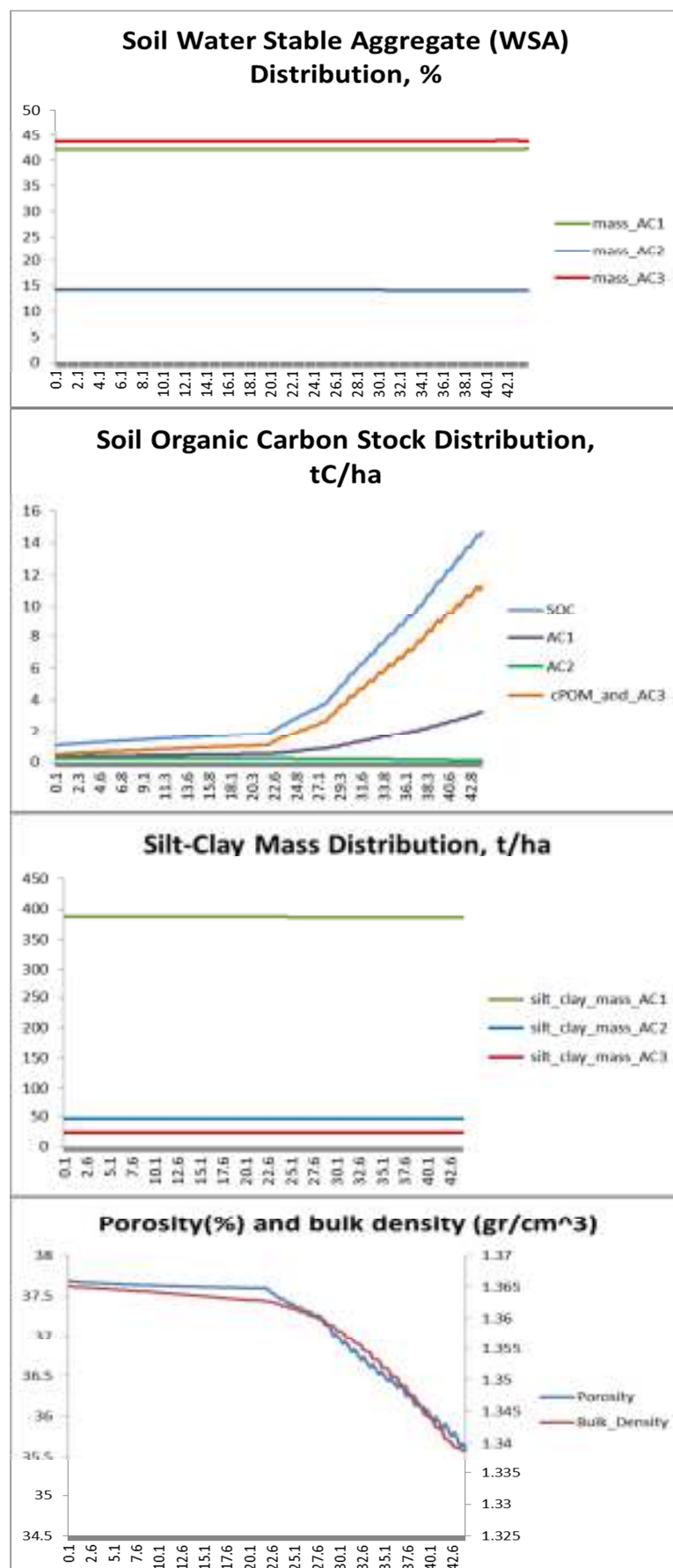


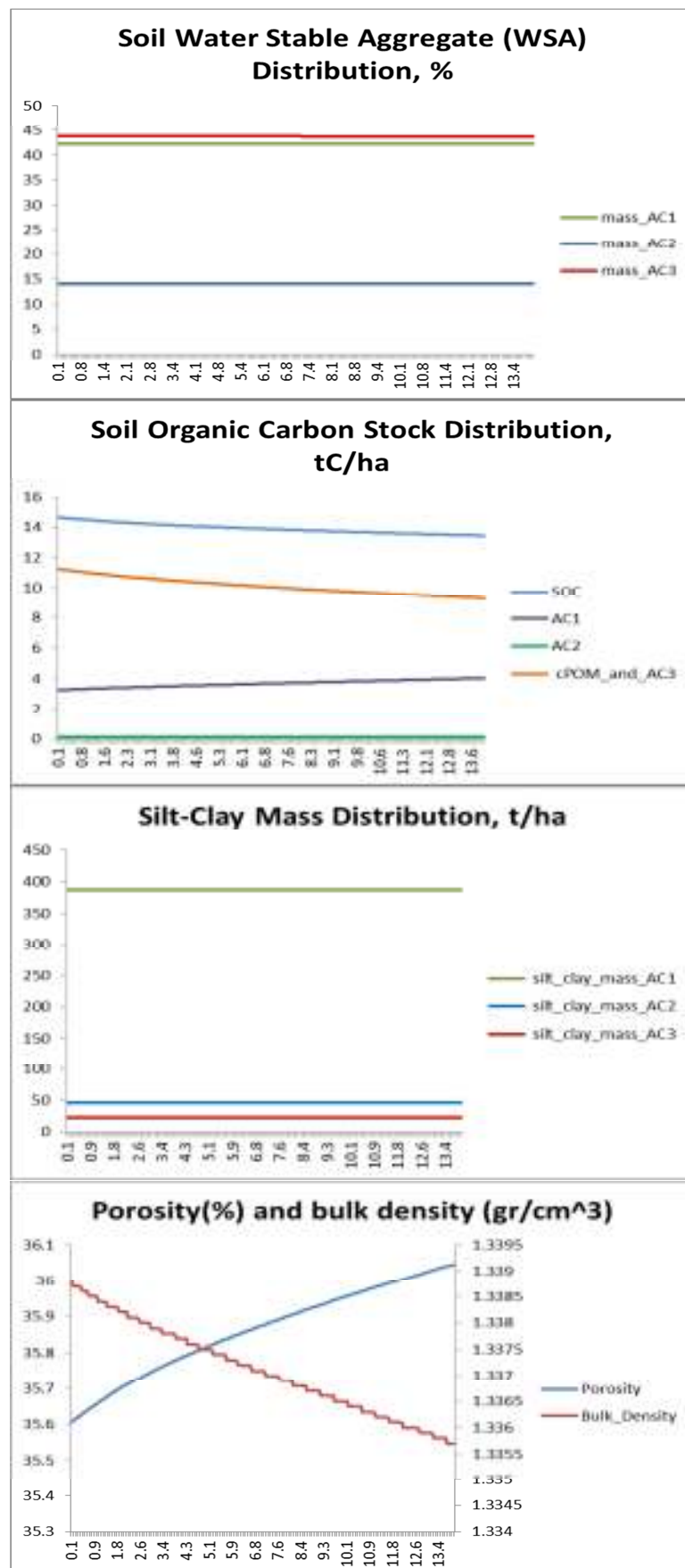
Μηλιά











Damma Glacier - Εδάφη μεγάλης ηλικίας

