ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΓΕΩΧΗΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η επίδραση των αλλαγών χρήσης γης και των κλιματικών αλλαγών στα εδάφη της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη

ΓΕΩΡΓΙΑ ΚΑΛΙΑΚΑΤΣΟΥ

ΧΑΝΙΑ

ΜΑΪΟΣ 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη

Η εντατικοποίηση της καλλιέργειας των εδαφών οδηγεί στη μείωση της οργανικής ύλης του άνθρακα, ενός από τους σημαντικότερους παράγοντες γονιμότητας του εδάφους. Την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ύλη επηρεάζουν και οι κλιματικές αλλαγές, αλλά και η πρακτική της προσθήκης εδαφοβελτιωτικών. Οι αλλαγές αυτές προσομοιώθηκαν, εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν με τη βοήθεια του μοντέλου RothC και αφορούσαν εδάφη που αποτελούνται από τρεις διαφορετικές λιθολογίες σε περιοχή των Χανίων Κρήτης. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με δεδομένα για το οργανικό υλικό και σωματιδιακό οργανικό υλικό του εδάφους και οι βαθμονομημένες τιμές και για τις τρεις λιθολογίες βρέθηκαν ότι είναι από 4,68 έως 5,25 tC ha^{-1} για την εισαγωγή φυτικού υλικού, από 0,11 έως 0,13 y^{-1} για το RPM και από 0,0351 έως 0,0495 y^{-1} για το HUM. Το μοντέλο, ωστόσο, εμπεριέχει αβεβαιότητες που οφείλονται στις αρχικές συνθήκες, στα δεδομένα εισαγωγής και στις έξι παραμέτρους. Βρέθηκε ότι μεγάλη ευαισθησία στα αποτελέσματα παρουσιάζει η εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων και ο ρυθμός αποδόμησης του RPM και του HUM. Μελετήθηκε η αλλαγή στην περιεκτικότητα σε οργανική ύλη του εδάφους για εδάφη που μετατρέπονται από θαμνότοποι σε καλλιέργειες και για ήδη υποβαθμισμένα εδάφη λόγω καλλιέργειας. Και στις δύο προσομοιώσεις, παρατηρήθηκε ότι στην παρούσα κατάσταση λόγω καλλιέργειας το SOC θα αυξηθεί στους σχιστόλιθους, ενώ θα μειωθεί στις μάργες και τους ασβεστόλιθους· κατά 27,94%, 18,24% και 12,18%, αντίστοιχα, ως ποσοστά του αρχικού SOC στην πρώτη και κατά 8,85%, 3,09% και 1,69% στη δεύτερη. Η παρατηρούμενη αύξηση του SOC στους σχιστόλιθους έναντι της μείωσης των άλλων δύο λιθολογιών αποδίδεται πιθανόν στην αυξημένη εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων που προέρχονται από τις καλλιέργειες αντίθετα με τους θαμνότοπους που δεν ενισχύουν τόσο αυτή την εισαγωγή, ενώ παράλληλα η παραγωγή βιομάζας είναι μικρότερη στους σχιστόλιθους από ότι στις μάργες και τους ασβεστόλιθους. Λόγω κλιματικών αλλαγών, στην πρώτη, οι σχιστόλιθοι θα δεσμεύσουν 3,85% έως και 4,08% παραπάνω της αρχικής ποσότητας SOC στο μέλλον, ενώ αντίστοιχα οι μάργες θα δεσμεύσουν 2,6% λιγότερο και οι ασβεστόλιθοι 1,73% έως και 1,87% λιγότερο. Με την προσθήκη εδαφοβελτιωτικών, ο άνθρακας που συσσωρευόταν ήταν περισσότερος στο σχιστόλιθο και ακολούθως στους ασβεστόλιθους και τις μάργες εξαιτίας του χαμηλότερου ρυθμού αποδόμησης της δεξαμενής του HUM στους ασβεστόλιθους ο

οποίος σχετίζεται με την υψηλότερη περιεκτικότητά τους σε άργιλο. Όμως, λόγω κλιματικών αλλαγών τα αποτελέσματα έδειξαν πως 0,35 έως και 0,8 t/ha λιγότεροι θα συσσωρευτούν από τη μέγιστη συσσώρευση που μπορεί να γίνει για κάθε εδαφοβελτιωτικό. Φαίνεται, πάντως, από τη μελέτη ότι οι επιπτώσεις της αλλαγής χρήσης γης είναι τόσο έντονες που παρεμποδίζουν την ικανότητά μας να προβλέψουμε τις αντίστοιχες επιπτώσεις λόγω κλιματικών αλλαγών.

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της καλύτερης ποιότητας ζωής και της εξέλιξης της επιστήμης, ο μέσος χρόνος ζωής των ανθρώπων αυξήθηκε με αποτέλεσμα ο πληθυσμός της γης ολοένα και να αυξάνεται. Η αύξηση αυτή του πληθυσμού, συνεπάγεται και το αυξανόμενο μέγεθος των ανθρώπινων αναγκών, από τις οποίες πρωταρχική είναι εκείνη της τροφής. Αυξανόμενη ανάγκη για τροφή σημαίνει αυξανόμενη ανάγκη για καλλιέργεια και παραγωγή πρωτογενών προϊόντων. Όμως, η εντατικοποίηση της αγροτικής παραγωγής και η χρήση αγροτικών πρακτικών με μοναδικό στόχο τη μεγιστοποίηση της αγροτικής παραγωγής, οδήγησε ιδιαίτερα τα τελευταία 60 χρόνια στην υποβάθμιση των εδαφών. Η υποβάθμιση οφείλεται στην απώλεια του οργανικού υλικού του εδάφους και της γονιμότητάς του και έχει αντίκτυπο και στη λειτουργία του εδάφους. Οι πρακτικές που χρησιμοποιούνται, όπως το βαθύ όργωμα οδηγούν στην καταστροφή της δομής του, δηλαδή των συσσωματωμάτων του, με αποτέλεσμα βιοδιαθέσιμο οργανικό υλικό που προστατευόταν σε μικροδομές του εδάφους να είναι πλέον προσβάσιμο στους αποδομητές, ενώ παράλληλα η κυκλοφορία του οξυγόνου και του νερού στο έδαφος να εμποδίζεται με αποτέλεσμα τη μείωση της λειτουργικότητας και αποδοτικότητας του εδάφους. Γίνεται λοιπόν επιτακτική η ανάγκη, να διατηρήσουμε την ποιότητα του δεύτερου πιο σημαντικού φυσικού πόρου μετά το νερό, του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να διατηρήσουμε τη γονιμότητά του ώστε να μπορεί να ανταποκρίνεται στις ανάγκες του ανθρώπου και όχι αντιθέτως να γίνεται δύσκολη η αποπεράτωσή τους (ανάγκη για χρήση λιπασμάτων που οδηγεί σε οικονομική επιβάρυνση) και μάλιστα σε μερικές περιπτώσεις να αποκλείεται λόγω της ακραίας περίπτωσης της υποβάθμισης του εδάφους, δηλαδή της ερημοποίησης.

Για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω ζήτημα της υποβάθμισης των εδαφών, πρωτίστως, έπρεπε να προβλεφθεί και να εκτιμηθεί η κατάσταση του εδάφους όσον αφορά την απώλεια του οργανικού υλικού του, αυτού του μέγιστης σημασίας παράγοντα για τη δομή και λειτουργία του εδάφους, ώστε στη συνέχεια να μπορούν να εξεταστούν τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει αειφόρος η λειτουργία του εδάφους και η αγροτική ανάπτυξη. Έτσι, εξετάστηκε η απώλειά/αύξησή του κάτω υπό δύο διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο αφορούσε την αλλαγή της οργανικής ύλης στο έδαφος λόγω κλιματικών αλλαγών και το δεύτερο λόγω της προσθήκης τριών διαφορετικών εδαφοβελτιωτικών. Και τα δύο σενάρια εξετάστηκαν συγκρίνοντας εικοσαετίες, όπου κάθε εικοσαετία την πρώτη φορά περιλάμβανε μετατροπή των εδαφών από θαμνότοπους σε καλλιέργειες και τη δεύτερη φορά αφορούσε ήδη υποβαθμισμένα εδάφη λόγω καλλιέργειας για 50 χρόνια. Ύστερα, τα σενάρια συγκρίθηκαν με την τωρινή εικοσαετία. Για τέτοιου είδους προβλέψεις χρησιμοποιούνται απαραίτητα και αρκετά αξιόπιστα εργαλεία, τα μοντέλα. Στην παρούσα μελέτη, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το μοντέλο RothC, το οποίο σε συνεργασία με το στατιστικό πρόγραμμα @RISK (Palisade) χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση Monte Carlo προσομοιώσεων. Έτσι, ήταν δυνατόν να γίνει ανάλυση ευαισθησίας της πρόβλεψης λόγω της πιθανής αλλαγής των παραμέτρων του μοντέλου, και αξιολόγηση της μοναδικότητα της λύσης που προέκυψε από την βαθμονόμηση για τη δέσμευση του άνθρακα στο έδαφος, μέσω της διαδικασίας της ανάλυσης αβεβαιότητας. Οι τελευταίες δύο αναλύσεις, η ανάλυση ευαισθησίας και η ανάλυση αβεβαιότητας, έδωσαν το εύρος των προβλεπόμενων τιμών ώστε η πραγματική τιμή να βρεθεί στο μέλλον σε αυτό και η διαχείριση του εδάφους βάσει αυτού του εύρους αποτελεσμάτων, και βεβαίως και της πραγματικής τιμής, να στοχεύει στην αειφορία του εδάφους.

Το πρόβλημα της υποβάθμισης εμφανίζεται σε κάθε έδαφος στο οποίο χρησιμοποιούνται μη αειφόρες αγροτικές πρακτικές. Το ίδιο λοιπόν, αφορά και τα καλλιεργήσιμα εδάφη της περιοχής του ποταμού Κοιλιάρη, στα Χανιά, τα οποία και εξετάστηκαν. Η περιοχή του Κοιλιάρη, μάλιστα, αποτελεί περιοχή διεθνούς μελέτης, καθώς συγκαταλέγεται στα διεθνή παρατηρητήρια της κρίσιμης ζώνης του εδάφους (soil critical zone observatory, CZO). Στην παρούσα εργασία μοντελοποιήθηκαν οι επιπτώσεις των αλλαγών χρήσης γης και των κλιματικών αλλαγών στα επίπεδα της οργανικής ύλης στα εδάφη σε τρεις διαφορετικές λιθολογίες (σχιστόλιθοι, μάργες, ασβεστόλιθοι). Τα εδάφη που μελετήθηκαν βρίσκονται στο ίδιο υψόμετρο, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι εξετάζονται σημεία τα οποία βρίσκονται σε ίδιο κλίμα και ίδιες καιρικές συνθήκες.

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν να εξεταστούν οι τρεις βασικοί τύποι εδάφους της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη σχετικά με την απώλεια του οργανικού άνθρακα λόγω της μετατροπής τους από μη καλλιεργήσιμα σε καλλιεργήσιμα εδάφη και λόγω των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών. Τέλος, να εξεταστεί η διαχείριση βελτίωσης της περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανικό άνθρακα εν μέσω της προσθήκης εδαφοβελτιωτικών κατά τη διάρκεια πολυετούς καλλιέργειας των παραπάνω εδαφών και κάτω υπό τις ίδιες κλιματικές αλλαγές.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Η οργανική ύλη στα εδάφη

Οι αγροτικές πρακτικές που στοχεύουν στην ολοένα και αυξανόμενη, λόγω της αύξησης του πληθυσμού, ανάγκη για πρωτογενή παραγωγή λαμβάνουν χώρα στην κρίσιμη ζώνη του εδάφους. Ως κρίσιμη ζώνη του εδάφους ορίζεται το ανώτερο στρώμα του φλοιού της γης που υπάρχει μεταξύ του βραχώδους υποστρώματος και της άνω άκρης των δέντρων (Brantley, 2006). Ως έδαφος ορίζεται το ανώτερο στρώμα του φλοιού που τοποθετείται μεταξύ του βραχώδους υποστρώματος και της επιφάνειας της γης, εξαιρουμένου του νερού, και είναι ο δεύτερος πιο σημαντικός φυσικός πόρος μετά από το νερό που παρουσιάζει μία σειρά από περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές λειτουργίες (Blum, 2005). Στο τμήμα του εδάφους υπάρχει ανόργανη και οργανική ύλη, νερό, αέρας και ζωντανοί οργανισμοί (COM(2006)231). Αποτελεί δε τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ γης, αέρα και υδάτινων πόρων και φιλοξενεί το μεγαλύτερο μέρος της βιόσφαιρας (COM(2006)231).

Καθώς ο σχηματισμός του εδάφους είναι μία διεργασία εξαιρετικά αργή, το έδαφος ουσιαστικά θεωρείται μη ανανεώσιμος πόρος ο οποίος, όμως, μας εξασφαλίζει τροφή, βιομάζα και πρώτες ύλες, χρησιμεύει ως πλαίσιο για τις δραστηριότητές μας, υπεισέρχεται στη διαμόρφωση τοπίου, αποτελεί συνιστώσα του φυσικού πλούτου και διαδραματίζει κεντρικό ρόλο ως παρακαταθήκη ενδιαιτημάτων και γονιδίων. Αποθηκεύει δε, διηθεί και μετασχηματίζει πολλές ουσίες, μεταξύ των οποίων είναι το νερό, τα θρεπτικά συστατικά και ο άνθρακας (COM(2006)231). Περιέχει μάλιστα το μεγαλύτερο αποθεματικό άνθρακα στον κόσμο (1500 γιγαντοτόνους) (COM(2006)231). Είναι ένα άκρως περίπλοκο και μεταβλητό μέσο καθώς έχουν εντοπιστεί περισσότεροι από 320 βασικοί τύποι εδάφους στην Ευρώπη, και σε κάθε τύπο υπάρχει τεράστιος αριθμός παραλλαγών από πλευράς φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων (COM(2006)231). Η δομή του εδάφους έχει καθοριστικό ρόλο στην επιτέλεση των λειτουργιών του. Τυχόν βλάβη της δομής του συνεπιφέρει βλάβες σε άλλα μέσα και οικοσυστήματα του περιβάλλοντος (COM(2006)231). Ωστόσο, υπόκειται συχνά σε μία σειρά διεργασιών και απειλών υποβάθμισης, μεταξύ των οποίων είναι η διάβρωση, η μείωση της οργανικής ύλης, η σημειακή και διάχυτη ρύπανση, η στεγανοποίηση, η συμπίεση, η μείωση της βιοποικιλότητας, η αλάτωση, οι πλημμύρες και οι κατολισθήσεις (COM(2006)231). Συνδυασμός αυτών σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα μπορεί να καταλήξει ακόμη και στην ακραία περίπτωση της ερημοποίησης (COM(2006)231).

Λόγω της σημαντικότητας των εδαφών σε παγκόσμια κλίμακα, όπως εύκολα προκύπτει από τα παραπάνω, έχουν προταθεί πολλοί δείκτες ποιότητας εδάφους, από την επιστημονική κοινότητα, βάσει των παραγόντων που την καθορίζουν (Stamati, 2012). Οι περισσότεροι δε από αυτούς τους δείκτες εστιάζουν στο οργανικό υλικό του εδάφους το οποίο είναι υπεύθυνο κατά ένα μεγάλο μέρος για τις βιολογικές, χημικές και φυσικές ιδιότητες του εδάφους (Krull et al., 2004).

Ο όρος ‘Οργανικό υλικό του εδάφους’ (Soil Organic Matter, SOM) έχει χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς με διαφορετικούς τρόπους για να περιγράψει τα οργανικά συστατικά του εδάφους. Περιλαμβάνει τα στοιχεία C, H, O, N, P και S (Krull et al., 2004) και είναι ουσιαστικά μία μείξη βιογενετικών συστατικών (υπολείμματα φυτικά, μικροβιακά, και ζώων) στα διάφορα στάδια της αποδόμησης, μικροοργανισμών και μη αποδομήσιμου φυτικού υλικού (Arias et al., 2005). Οι ζωντανοί οργανισμοί του εδάφους και οι φυτικές ρίζες δε θεωρούνται SOM μέχρι να πεθάνουν και να αρχίσουν να αποσυντίθενται.

Το οργανικό υλικό του εδάφους, αν και βρίσκεται σε μικρές ποσότητες στα εδάφη, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις λειτουργικές διεργασίες του εδάφους (COM(2006)231) και στις ιδιότητές του: βιολογικές (πηγή θρεπτικών για τα φυτά, υπόστρωμα για την μικροβιακή δραστηριότητα), χημικές (ρύθμιση και αλλαγές του pH), και φυσικές (σταθεροποίηση της δομής του εδάφους), ενώ αποτελεί δρώσα δύναμη για την αποσάθρωση των ορυκτών (παραγωγή μικρο-θρεπτικών) και περιβαλλοντικό ρυθμιστή, πρώτον γιατί προστατεύει τις λεκάνες απορροής και τα υπόγεια νερά από τα γεωργικά χημικά και τα δημοτικά απόβλητα, και δεύτερον γιατί συσσωρεύει τον άνθρακα ο οποίος θα μπορούσε διαφορετικά να συμβάλει στην αύξηση των αερίων θερμοκηπίου (CO_2) και στην αλλαγή επομένως του κλίματος της γης. Συνολικά, στα εδάφη συγκρατείται πάνω από δύο φόρες περισσότερος άνθρακας από ότι στη βλάστηση και την ατμόσφαιρα. Η ποσότητα του άνθρακα που δεσμεύεται ετησίως στα εδάφη είναι τέσσερις φορές λιγότερη από τους 8 Gt άνθρακα που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα από ανθρωπογενείς δραστηριότητες- αναδεικνύοντας τη σημασία του SOM (Soil Organic Matter) σε σχέση με τις κλιματικές αλλαγές (Lal, 2004a).

Οι Doran και Parkin (1994) και οι Doran και Safley (1997) αρχικά διαφοροποιούνταν μεταξύ του όρου 'ποιότητα του εδάφους' και του όρου 'υγεία του εδάφους' πριν να καταλήξουν να χρησιμοποιούν σφαιρικά τον όρο 'υγεία του εδάφους' και να τον καθορίσουν ως *'τη συνεχόμενη ικανότητα του εδάφους να έχει ζωτική σημασία, μέσα στα όρια οικοσυστήματος και των πεδίων που χρησιμοποιούνται για καλλιέργεια, να διατηρεί τη βιολογική παραγωγή, να αναβαθμίζει την ποιότητα του αέρα και του νερού του περιβάλλοντος, και να διατηρεί τη φυτική, ζωική και ανθρώπινη υγεία'*. Παρόλα αυτά, η γενική αντίληψη ενός υγιούς ή υψηλής ποιότητας εδάφους είναι μία αντίληψη που παρουσιάζει επαρκώς μόνο τις λειτουργίες οι οποίες είναι σημαντικές για τους ανθρώπους. Λαμβάνοντας υπόψη την ευρεία ποικιλία δεικτών που παρουσιάστηκαν, οι Karlen et al. (2003) και οι Norfleet et al. (2003) επεσήμαναν πως η ποιότητα του εδάφους χρειάζεται να εκτιμηθεί σε σχέση με το λόγο για τον οποίο χρησιμοποιείται το έδαφος, καθώς ένα συγκεκριμένο έδαφος μπορεί να είναι υψηλής ποιότητας για μία λειτουργία, αλλά μπορεί να παρουσιάζει ανικανότητα για μία άλλη. Συγκεκριμένα, η καταλληλότητα του εδάφους για τη διατήρηση της ανάπτυξης των φυτών και της βιολογικής δραστηριότητας ορίζεται από τις φυσικές (πορώδες, ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό, δομή και όργωμα) και χημικές ιδιότητες (ικανότητα παροχής θρεπτικών συστατικών, pH, περιεκτικότητα αλάτων), αρκετές από τις οποίες βασίζονται στην περιεκτικότητα σε SOM (Doran and Safley, 1997). Παρομοίως, ο Elliott (1997) εισήγαγε την άποψη πως το SOM είναι ένας δείκτης κλειδί για την υγεία του εδάφους. Γενικά, αυξήσεις στο SOM φαίνονται να είναι επιθυμητές από αρκετούς αγρότες καθώς υψηλότερα επίπεδα παρατηρείται να είναι ευθέως συσχετιζόμενα με την καλύτερη διατροφή των φυτών, την ευκολία στην καλλιέργεια, την ευκολία στην προετοιμασία του εδάφους για σπορά, τη μεγαλύτερη σταθερότητα των συσσωματωμάτων, τη μειωμένη φαινομενική πυκνότητα, την αυξημένη ικανότητα συγκράτησης νερού, το ενισχυμένο πορώδες και τη γρηγορότερη θέρμανση του εδάφους κατά την άνοιξη (Carter and Stewart, 1996, Lal, 2002). O Reeves (1997) επεσήμανε πως *'το* SOM *είναι το πιο συχνά αναφερόμενο χαρακτηριστικό για μελέτες σε μακροχρόνιες καλλιέργειες και επιλέγεται ως ο πιο σημαντικός δείκτης της ποιότητας του εδάφους και της αγρονομικής αειφορίας εξαιτίας της επιρροής του στους φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς δείκτες της ποιότητας του εδάφους'*. Παρόλα αυτά, όπως επεσήμαναν οι Janzen et al. (1992), η σχέση μεταξύ των δεικτών της ποιότητας του εδάφους (π.χ. SOM) και των λειτουργιών του εδάφους δε συμμορφώνονται πάντα με μία απλή σχέση αυξανόμενη με το μέγεθος του δείκτη και επομένως 'το μεγαλύτερο δεν είναι απαραιτήτως και καλύτερο'.

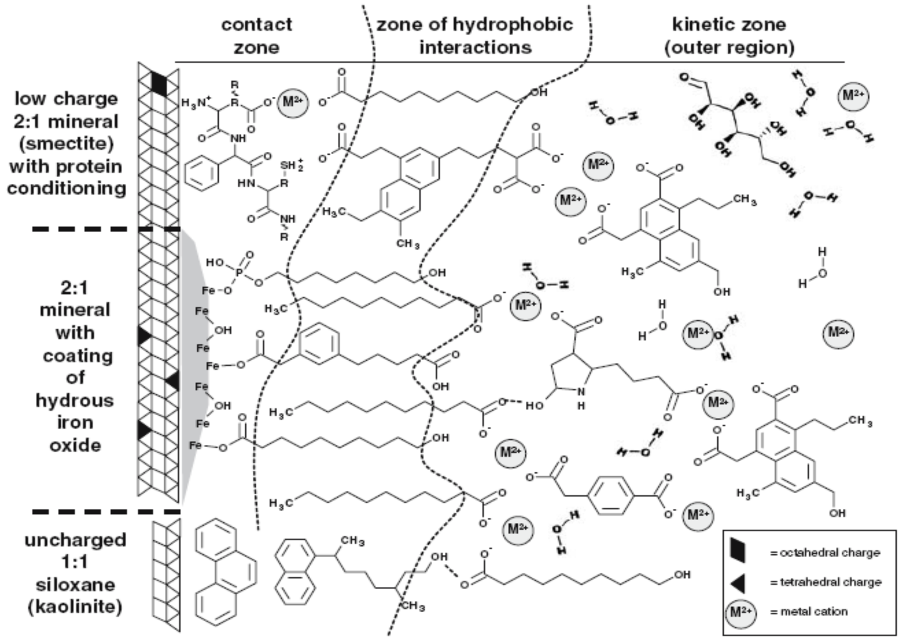
2.2 Η σταθεροποίηση της οργανικής ύλης στα εδάφη

Το μεγαλύτερο μέρος του οργανικού υλικού (δηλαδή η λιγνίνη, η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη, τα λιπίδια και οι πρωτεΐνες) μπορεί να αποδομηθεί πλήρως κάτω υπό 'τέλειες' συνθήκες (π.χ. επαρκή παροχή οξυγόνου), ακόμη και αν κάποιες ποσότητες οργανικού υλικού μπορεί να χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να αποδομηθούν από ότι άλλες (όπως το ξύλο που χρειάζεται περισσότερο χρόνο από τα φύλλα) (Uta Stockmann et al., 2011). Η αποδόμηση των υπολειμμάτων είναι η κύρια δίοδος της απελευθέρωσης άνθρακα στα εδάφη (Uta Stockmann et al., 2011). Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό της αποδόμησης είναι το κλίμα, η υγρασία, η θερμοκρασία, η ποιότητα των υπολειμμάτων, και η σύνθεση της μικροβιακής κοινότητας στο έδαφος (Meentemeyer, 1978, Melillo et al., 1982, Parton et al., 2007). Η εισαγωγή υπολειμμάτων είναι εκείνη που παρέχει την πηγή άνθρακα για τη μικροβιακή ανάπτυξη και δραστηριότητα, πράγμα που σημαίνει όσο υψηλότερη είναι η ποιότητα (δηλαδή πιο εύκολα αποδομήσιμο) τόσο πιο γρήγορα μπορεί να μεγαλώσει η μικροβιακή κοινότητα (Agren and Bosatta, 1996). Ωστόσο, χαρακτηριστικά του αποδομήσιμου υλικού, όπως ο λόγος C:N και η περιεκτικότητα σε λιγνίνη, είναι κρίσιμα για να καθορίσουν πόσο γρήγορα θα έχουμε παραγωγή των προϊόντων αποδόμησης (Melillo et al., 1982, Meentemeyer, 1978) και γενικά, η αποδόμηση των υπολειμμάτων είναι αρνητικά συσχετισμένη με το λόγο C:N του υλικού, την περιεκτικότητα σε λιγνίνη και το λόγο λιγνίνη:N, και θετικά συσχετισμένη με τις συγκεντρώσεις Ν (Melillo et al., 1989, Melillo et al., 1982). Τέλος, μελέτες έχουν δείξει πως ο βαθμός αποδόμησης αυξάνεται με τη μείωση του μεγέθους των συσσωματωμάτων (von Lutzow et al., 2007).

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

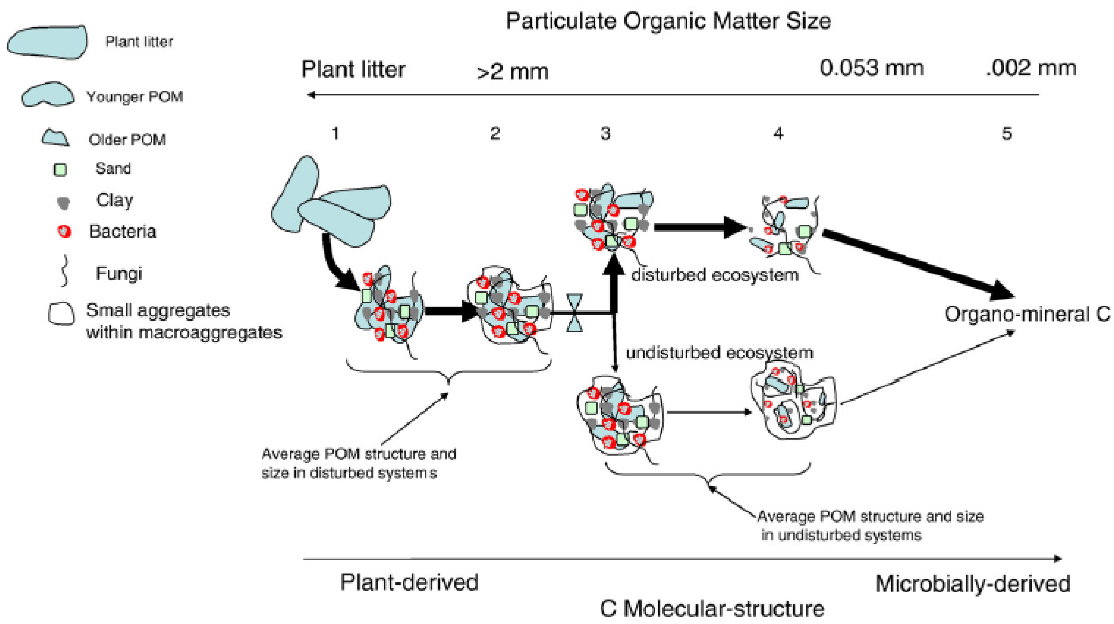
1) Τη σταθεροποίηση από τις αλληλεπιδράσεις των οργανικών με τα ορυκτά του εδάφους. Ποσότητα του οργανικού υλικού, δηλαδή τα αποσυνθεμένα κατάλοιπα ή/και απομεινάρια των μικροβίων και μυκήτων, δεσμεύονται από τα ορυκτά (Adams et al., 2011), προσδένονται δηλαδή στην επιφάνεια των ορυκτών με γέφυρες κατιόντων,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

Η πιο περιεκτική εννοιολογική προσέγγιση της αλληλεπίδρασης των οργανικών και των ορυκτών στα εδάφη είναι το μοντέλο τριών στοιβάδων (κινητική ζώνη, υδροφοβική ζώνη, και ζώνη επαφής) που πρότειναν οι Kleber et al. (2007) το οποίο φαίνεται και στο Σχήμα 2.2.1. Ένας λοιπόν πολύ σημαντικός παράγοντας για την προστασία του άνθρακα είναι η παρουσία αργίλου και οξειδίων, καθώς τα οργανικά και οι οργανο-ορυκτές ποσότητες απορροφώνται στις επιφάνειές τους. Πιο συγκεκριμένα, οι αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες των αργιλικών ορυκτών προσδένονται με τις αρνητικά φορτισμένες ποσότητες με γέφυρες κατιόντων (Jastrow et al., 2007). Έτσι, η διαθεσιμότητα πολλαπλών κατιόντων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό συμπλόκων αργίλου, κατιόντων και οργανικών. Παρομοίως, η διαθεσιμότητα οξειδίων σιδήρου και αλουμινίου είναι αυτή που καθορίζει την πρόσδεση στην επιφάνειά τους οργανικής ποσότητας μέσω ηλεκτροστατικών δυνάμεων.



Σχήμα 2.1 Μοντέλο τριπλής ζώνης των αλληλεπιδράσεων οργανικών και των ορυκτών (όπως προτείνεται από τους Kleber et al., 2007).

2) Τη φυσική προστασία εν μέσω της ενθυλάκωσης οργανικών στις δομές των συσσωματωμάτων, μάκρο και μίκρο-συσσωματωμάτων, του βιοτικού δηλαδή αποκλεισμού, ο οποίος φαίνεται να είναι και ο κύριος μηχανισμός σταθεροποίησης του SOM στα εδάφη με μικρή περιεκτικότητα σε άργιλο (Six et al., 2002a, Six et al., 2002b)**.** Έχουν αναγνωριστεί δύο βασικά εννοιολογικά μοντέλα σχετικά με τον σχηματισμό των συσσωματωμάτων (Plante and McGill, 2002; Nikolaidis and Bidoglio, 2011): i) το ιεραρχικό μοντέλο που προτείνει το σχηματισμό των μικρο-συσσωματωμάτων και εν συνεχεία τον σχηματισμό τον μακρο-συσσωματωμάτων από τον συνδυασμό των μικρο-συσσωματωμάτων, ii) και το μοντέλο που προτείνει ότι πρωτίστως λαμβάνει χώρα ο σχηματισμός των μακρο-συσσωματωμάτων γύρω από το σωματιδιακό φυτικό υλικό και έπειτα ακολουθεί η απελευθέρωση των μικρο-συσσωματωμάτων καθώς τα υλικά αποσυντίθενται (Σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2 Κύκλος των μακρο-συσσωματωμάτων: διεργασία σχηματισμού και καταστροφής τους (όπως προτείνεται από τους Grandy and Neff, 2008).

Η συσσωμάτωση των σωματιδίων είναι αυτή που παρέχει τη δομή στα εδάφη (μέγεθος και σταθερότητα των συσσωματωμάτων) και γι αυτό έχει συσχετισθεί με τη γονιμότητα του εδάφους (Stamati et al., 2012). Για παράδειγμα, αγρονομικά πολύτιμο έδαφος είναι το έδαφος στο οποίο μεγαλύτερο από το 60% των συσσωματωμάτων του βρίσκεται σε μία κλίμακα μεταξύ των 0,25 και 10 mm (Banwart et al., 2011). Τα μίκρο και μάκρο συσσωματώματα παρέχουν μία φυσική προστασία από τη δραστηριότητα της αποδόμησης του οργανικού υλικού του εδάφους και του αζώτου που είναι ενσωματωμένα στα συσσωματώματα και επηρεάζουν επομένως τον κύκλο του άνθρακα και του αζώτου στα εδάφη. Η μειωμένη αυτή δραστηριότητα της αποδόμησης στις δομές των συσσωματωμάτων οφείλεται στην έλλειψη οξυγόνου, στη μη διαθεσιμότητα νερού και στη μη προσβασιμότητα ενζύμων (Jastrow, 2007), εφόσον θεωρείται ότι τα βακτήρια, τα πρωτόζωα και τα νηματοειδή μπορούν να περάσουν από πόρους μεγαλύτερους από 3μm, 5μm και 30μm αντίστοιχα. Τέλος, χαρακτηριστικά αναφέρουμε πως όσο πιο αργός είναι ο κύκλος των συσσωματωμάτων τόσο πιο υψηλό θα είναι το επίπεδο προστασίας.

2.2.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συσσωμάτωση στα εδάφη

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

- <u>Οργανική ουσία</u>

Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων και ο κύκλος ζωής τους κυρίως εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα των φυτικών υπολειμμάτων και τις διάφορες άλλες μορφές της οργανικής ουσίας που εισέρχονται στο έδαφος (Abiven et al., 2007, Abiven et al., 2009). Αφού η οργανική ύλη του εδάφους είναι το κέντρο σχηματισμού των σταθερών εδαφικών μάκρο-συσσωματωμάτων έχει βρεθεί μια δυνατή θετική συσχέτιση μεταξύ της σταθερότητας των συσσωματωμάτων από πλευράς της μέσης διαμέτρου MWD (mm) και της ποσοστιαίας περιεκτικότητας (%) του εδάφους σε οργανική ύλη. Μια τέτοια συσχέτιση είναι σημαντική για εδάφη που είναι παρόμοιας ορυκτολογικής σύστασης και υφής (Boix-Fayos et al., 2001). Παράλληλα μελέτες σχετικά με τη σύνθεση της οργανικής ύλης του εδάφους έδειξαν ότι η αναλογία άνθρακα/άζωτο μειώνεται καθώς μειώνεται το μέγεθος των συσσωματωμάτων (Elliot, 1986, Gupta and Germida, 1988, Angers and Carter, 1996). Οι Krull et al., (2004) παρουσίασαν μια σύνοψη των μελετών με τους σχετικούς αλγορίθμους που συσχετίζουν τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων με την οργανική ύλη καθώς και αυτούς που απέτυχαν να δώσουν κάποια σημαντική συσχέτιση.

- Ζωντανοί οργανισμοί

Η μακροπανίδα του εδάφους παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό μάκρο συσσωματωμάτων. Το μεγαλύτερο μέρος της μακροπανίδας στα εύκρατα εδάφη είναι γαιοσκώληκες και στα εύκρατα βοσκοτόπια ο πληθυσμός τους μπορεί να φτάνει και τους 1000-2000 ανά m^2 (Six et al., 2004). Οι γαιοσκώληκες συνεισφέρουν σε μεγάλο βαθμό στη συσσωμάτωση αξιοποιώντας τα φυτικά υπολείμματα μαζί με το χώμα, περνώντας τα από το έντερό τους και εκκρίνοντας υγρά που προκύπτουν από ζύμωση. Οι γαιοσκώληκες επομένως μεσολαβούν στο σχηματισμό και των μίκρο και μάκρο συσσωματωμάτων στα εδάφη, η σταθερότητα των οποίων εξαρτάται από την ποιότητα του οργανικού υλικού που καταναλώνεται από τους γαιοσκώληκες. Επιπρόσθετα, οι γαιοσκώληκες συνεισφέρουν στο σχηματισμό συσσωματωμάτων μέσω της διαδικασίας τους να τρυπώνουν, καθώς εναποθέτουν στα ‘τοιχώματα’ των ανοιγμάτων που δημιουργούν βλέννα η οποία μαζί με την άργιλο του εδάφους μπορεί να δημιουργήσει μία σταθερή δομή (Six et al., 2004). Τέλος, έχει βρεθεί ότι ο σχηματισμός μάκρο συσσωματωμάτων καθυστερεί σημαντικά (28-42 μέρες) στα εδάφη που έχουν υποστεί χρήση μυκητοκτόνων σε αντίθεση με αυτά που δεν έχουν υποστεί τέτοια χρήση, τονίζοντας έτσι τη σημαντικότητα της βιομάζας των μυκήτων στο σχηματισμό μάκρο συσσωματωμάτων (Helfrich et al., 2008).

- Ριζικό σύστημα

Οι ρίζες επηρεάζουν τη συσσωμάτωση του εδάφους εν μέσω της περιπλοκής των σωματιδίων του εδάφους με το σύστημα των μυκόριζων και τα εξιδρώματα των ριζών (Jastrow et al., 2007, Six et al., 2004). Μεγάλες ποσότητες οργανικού υλικού απελευθερώνονται στα εδάφη από τις ρίζες (ριζοεναπόθεση), ειδικά στα ζεστά- υγρά κλίματα. Έτσι, μία μεγάλη δραστήρια μικροβιακή βιομάζα αναπτύσσεται στη ριζόσφαιρα. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί πως έχει αναφερθεί ότι οι ρίζες, τα τριχίδια των ριζών και οι υφές απορροφούν νερό από το γύρω χώμα προκαλώντας έτσι τοπική ξηρασία, η οποία μπορεί να έχει το ίδιο σταθεροποιητικές όσο, όμως, και καταστροφικές επιρροές στα μάκρο-συσσωματώματα (Haynes and Beare, 1996).

- Παρουσία αργίλου, κατιόντων και οξειδίων

Ακόμη, ένας πολύ σημαντικός παράγων για την προστασία του άνθρακα είναι η παρουσία αργίλου και οξειδίων, καθώς τα οργανικά και οι οργανο-ορυκτές ποσότητες απορροφώνται στις επιφάνειές τους και δεν αποδομούνται. Πιο συγκεκριμένα, οι αρνητικά φορτισμένες επιφάνειες των αργιλικών ορυκτών προσδένονται με τις αρνητικά φορτισμένες ποσότητες με γέφυρες κατιόντων (Jastrow et al., 2007). Έτσι, η διαθεσιμότητα πολλαπλών κατιόντων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό συμπλόκων αργίλου, κατιόντων και οργανικών. Οι Six et al (2002a) αντιλήφθηκαν πως η μέγιστη ικανότητα φυσικής προστασίας για την οργανική ύλη καθορίζεται από τη μέγιστη μικρο-συσσωμάτωση, η οποία με τη σειρά της καθορίζεται από την περιεκτικότητα αλλά και τον τύπο της αργίλου. 2:1 άργιλοι σταθεροποίησαν περισσότερο C σε σύγκριση με τους 1:1 αργίλους (reviews of Six et al., 2002a and Six et al., 2002b) καθώς έχουν υψηλότερη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και μεγαλύτερη εξωτερική επιφάνεια. Έχει βρεθεί επίσης, μία άμεση σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε ιλύ και άργιλο του εδάφους και στην ποσότητα του άνθρακα του εδάφους που προστατεύεται από την ιλύ και την άργιλο, υποδεικνύοντας έτσι και ένα επίπεδο κορεσμού για τον άνθρακα που συνδέεται με την ποσότητα της ιλύος και της αργίλου στο έδαφος. Παράλληλα, η διαθεσιμότητα οξειδίων σιδήρου και αλουμινίου είναι αυτή που καθορίζει την πρόσδεση οργανικής ποσότητας στην επιφάνειά τους μέσω ηλεκτροστατικών δυνάμεων. Η σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων και της οργανικής ύλης του εδάφους επηρεάζεται με τρεις τρόπους από τα οξείδια:

1. Η οργανική ουσία προσροφάται στις επιφάνειες των οξειδίων

2. Ένας ηλεκτροστατικός δεσμός δημιουργείται μεταξύ των θετικά φορτισμένων οξειδίων και των αρνητικά φορτισμένων ορυκτών της αργίλου

3. Ένα κάλυμμα από οξείδια στην επιφάνεια των ορυκτών δημιουργεί συνδετικές γέφυρες μεταξύ πρωτογενών και δευτερογενών σωματιδίων.

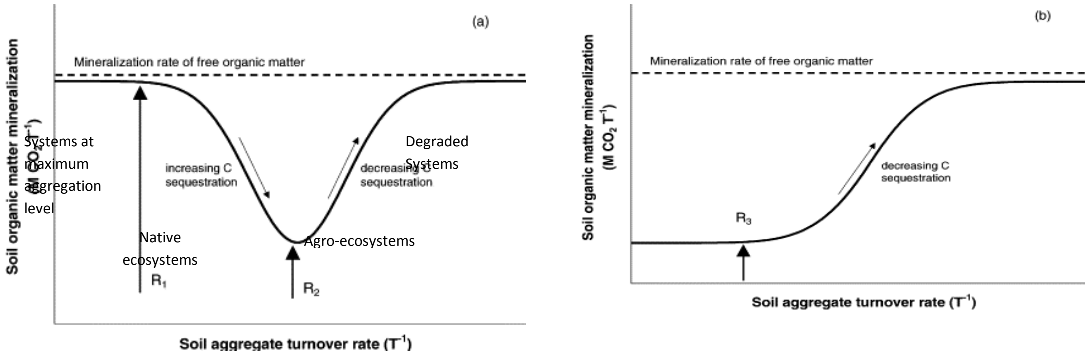
Η τελευταία διαδικασία αναφέρεται σε αυτή που σχετίζεται περισσότερο με τη μεγαλύτερη σταθερότητα των μακρο-συσσωματωμάτων στα εδάφη που είναι πλούσια σε οξείδια (oxisols) συγκρινόμενα με εδάφη με χαμηλά επίπεδα οξειδίων (Six et al., 2004). Παράγοντες όπως το pH, οι συνθήκες οξειδοαναγωγής και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας των ορυκτών και του οργανικού υλικού επηρεάζουν το βαθμό ρόφησης και τη δημιουργία συμπλόκων στις επιφάνειες των οργανικών και των ορυκτών.

- Κλίμα

Ο βαθμός της συσσωμάτωσης σχετίζεται ακόμη και με τις κλιματικές συνθήκες κάτω από τις οποίες σχηματίστηκε το έδαφος. Όσο ο δείκτης βροχόπτωσης/δυνητικής-εξατμισοδιαπνοής αυξάνεται τόσο το ποσοστό ιλύς-αργίλου που συσσωματώνεται αυξάνεται έως ότου φτάσει μια μέγιστη τιμή που αντιστοιχεί σε αναλογία βροχόπτωσης/δυνητικής-εξατμισοδιαπνοής από 0,4 έως 0,6. Η ικανότητα του εδάφους να δημιουργεί συσσωματώματα αυξάνεται από τα Entisols προς τα Vertisols και Mollisols (Dalal and Bridge, 1996). Σε υψηλότερες τιμές P/PET η ικανότητα συσσωμάτωσης του εδάφους μπορεί να μειωθεί όπως με τα Oxisols (Stamati, 2012).

Ο κύκλος ζωής των συσσωματωμάτων στο έδαφος και η ανοργανοποίηση της οργανικής ουσίας

Όσο πιο αργή είναι η διαδικασία του κύκλου των συσσωματωμάτων τόσο υψηλότερο είναι το επίπεδο προστασίας της οργανικής ύλης (Σχήμα 2.3). R3 είναι το όριο στον κύκλο των συσσωματωμάτων οπού η οργανική ουσία αρχίζει να εκτίθεται. Από την άλλη πλευρά για τα φρέσκα φυτικά υπολείμματα το βέλτιστο είναι ένας ενδιάμεσος ρυθμός στον κύκλο των συσσωματωμάτων έτσι ώστε να υπάρχει σχηματισμός συσσωματωμάτων και μεταγενέστερα προστασία του C (υψηλότερο ποσοστό δέσμευσης). R1 είναι το όριο στον κύκλο των συσσωματωμάτων όπου η οργανική ουσία έχει συσσωματωθεί πριν ανοργανοποιηθεί και R2 είναι το όριο όπου η εισερχόμενη οργανική ουσία επανεκτίθεται πιο γρήγορα από ότι ενσωματώνεται. Αυτή η ιδέα είναι σύμφωνη με τα ευρήματα Kimetu et al. (2009), τα οποία δείχνουν ότι η ικανότητα σταθεροποίησης της οργανικής ουσίας του εδάφους ήταν υψηλότερη σε εδάφη που καλλιεργούταν για περίπου 20 χρόνια σε σύγκριση με υποβαθμισμένα εδάφη και εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα. Υποστήριξαν ακόμη ότι ανάλογα με το επίπεδο κορεσμού του εδάφους σε άνθρακα, τα εδάφη με υψηλό ποσοστό οργανικού άνθρακα έχουν υψηλούς ρυθμούς ανοργανοποίησης του ασταθούς άνθρακα που πιθανότατα να οφείλεται στην περιορισμένη προστασία της οργανικής ύλης από τα ορυκτά.



Σχήμα 2.3 Αλλαγή στον κύκλο των συσσωματωμάτων και ρυθμός ανοργανοποίησης του σταθεροποιημένου και πρόσφατα προστιθέμενου C στα οικοσυστήματα (Plante and McGill, 2002).

Στα αγρό-οικοσυστήματα τα μάκρο-συσσωματώματα παρουσιάζουν μεγάλη εποχιακή διακύμανση (Six et al., 2004). Σε ένα γρήγορο κύκλο ζωής τα μάκρο-συσσωματώματα παρέχουν άμεση προστασία στη νέο εισαχθείσα οργανική ύλη και επιτρέπουν την μεταφορά αζώτου και άνθρακα στα μίκρο-συσσωματώματα, όπου εκεί πιθανόν να σταθεροποιηθούν μετά τη θραύση των μάκρο-συσσωματωμάτων (Helfrich et al., 2008). Ο Jastrow (1996) βρήκε ότι η συσσωρευμένη οργανική ύλη στα μάκρο-συσσωματώματα ήταν σχετικά φρέσκια αλλά λιγότερο από το 20% του συσσωρευμένου άνθρακα συναντάται στη μορφή της σωματιδιακής οργανικής ύλης. Η μεγαλύτερη ποσότητα συσσωρευμένου άνθρακα συναντάται στο κλάσμα ιλύς-αργίλου των μάκρο-συσσωματωμάτων. Έχει επίσης παρατηρηθεί ένα κατώτατο όριο περιεκτικότητας οργανικού άνθρακα για τον σχηματισμό συσσωματωμάτων (Jastrow, 1996; Krull et al., 2004).

2.3 Οι επιπτώσεις των αλλαγών χρήσης γης και των κλιματικών αλλαγών στην οργανική ύλη των εδαφών

Οι αγροτικές πρακτικές που χρησιμοποιούνται στην κτηνοτροφία και τη γεωργία και η εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής κατά τη διάρκεια των προηγούμενων 60 χρόνων έχουν επηρεάσει τις λειτουργίες του εδαφικού οικοσυστήματος, προκαλώντας πολλές φορές μάλιστα την κατάρρευση της λειτουργικότητάς του και δυσμενείς επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού και του εδάφους. Αλλαγές στις χρήσεις γης όπως η μετατροπή εδαφών με φυσική βλάστηση σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις, η μείωση της υπέργειας βιοποικιλότητας εξαιτίας των καλλιεργητικών πρακτικών και της υπερβόσκησης, καθώς και οι κλιματικές αλλαγές μπορούν να οδηγήσουν σε απότομες αλλαγές στο εδαφικό οικοσύστημα και να καταλήξουν σε μακράς διάρκειας μεταβολές τόσο στο τοπίο όσο και στην βιοτική και αβιοτική δομή του εδάφους (Nikolaidis, 2011).

Η μετατροπή εδαφών με φυσική βλάστηση σε καλλιεργήσιμα εδάφη ή βοσκοτόπια έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της φυτικής κάλυψης και ως εκ τούτου τη μείωση του φυτικού υπολειμματικού υλικού που εισέρχεται και ενσωματώνεται στο έδαφος, μεγαλύτερη διάβρωση και συμπίεση του εδάφους (Bastida et al., 2006, Li et al., 2007), και εν τέλει καταστροφή της δομής του εδάφους και απώλεια μεγάλου ποσοστού της οργανικής ύλης ή/και υποβάθμιση της ποιότητας της. Και αυτό γιατί, κατά τη διάρκεια του οργώματος ένα μέρος των συσσωματωμάτων καταστρέφεται γρήγορα και το φυσικά προστατευόμενο οργανικό υλικό εκτίθεται (Stamati et al., 2012). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το βιοδιαθέσιμο κλάσμα να γίνεται πλέον και βιοπροσβάσιμο και να μπορεί εν συνεχεία να οξειδωθεί και να οδηγήσει σε εκπομπές CO_2 και ελάττωση του SOM (Balesdent et al., 1998) και επομένως στην υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους (Stamati et al., 2012). Με δεδομένο ότι τα μακρο-συσσωματώματα συνίσταται κυρίως από εύκολα βιοδιαθέσιμο SOM, μπορούμε να πούμε ότι η μεγαλύτερη μείωση του SOM που σημειώνεται παραπάνω αποδίδεται στην καταστροφή των μάκρο-συσσωματωμάτων (Emadi et al., 2009). Ειδικότερα, το οργανικό κλάσμα που κυρίως επηρεάζεται από το όργωμα είναι το ελαφρύ κλάσμα με πυκνότητα μικρότερη από 1.6-2 g cm^{-3}, το οποίο αποτελείται πρωτίστως από σωματιδιακό οργανικό υλικό (POM) (Wagai et al., 2008), ενώ το πιο βαρύ κλάσμα επηρεάζεται κυρίως σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου (Don et al., 2009).

Οι επιπλέον εκπομπές CO_2 λόγω καταστροφής των συσσωματωμάτων λόγω του περισσότερο βιοπροσβιβάσιμου άνθρακα, όπως σημειώνεται παραπάνω, αναμένεται με τη σειρά τους να έχουν επίδραση στο κλίμα, με αλλαγές σε αυτό λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου (COM(2006)231). Οποιαδήποτε ενίσχυση των συγκεντρώσεων αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα θα επιταχύνει το ρυθμό θέρμανσης η οποία με τη σειρά της θα αλλάξει την πρωτογενή παραγωγικότητα (net primary productivity, NPP), την εισαγωγή C στο έδαφος, τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος και τελικά θα οδηγήσει στην απελευθέρωση περαιτέρω CO_2 από το έδαφος (Krull et al., 2004). Το φαινόμενο του θερμοκηπίου με τη σειρά του οδηγεί σε ακραία καιρικά φαινόμενα όπως η διάβρωση, οι κατολισθήσεις, η αλάτωση, αλλά και η μείωση της οργανικής ύλης (COM(2006)231). Ο Kirschbaum

(2000), πάντως, κατέληξε πως η παγκόσμια θέρμανση είναι πιθανό να μειώσει τον οργανικό άνθρακα του εδάφους με την αύξηση των ρυθμών αποδόμησης. Αλλά ταυτοχρόνως τα αυξημένα επίπεδα CO_2 οδηγούν στην αύξηση της πρωτογενούς παραγωγικότητας η οποία είναι πιθανό και να αυξήσει τον οργανικό άνθρακα του εδάφους (Krull et al., 2004) έχοντας μάλιστα τη δυνατότητα να αντισταθμίζει τις εκπομπές ορυκτών καυσίμων από 0,4 σε 1,2 Gt C yr^{-1}, ισοδύναμα με το 5 έως 15% των παγκόσμιων εκπομπών (Lal, 2004a). Ωστόσο, οι επιρροές στο δίκτυο από τις αλλαγές στον οργανικό άνθρακα του εδάφους λόγω των ενισχυμένων επιπέδων ατμοσφαιρικού CO_2 προβλέφθηκε να είναι μικρές για τους επόμενους αιώνες (Krull et al., 2004).

Στην Ευρώπη συνολικά το ποσοστό των εδαφών με οργανική ύλη λιγότερη από 2.6% ανήλθε από 35% σε 42% κατά τη διάρκεια της περιόδου 1980-1995. Η υπερβόσκηση από μόνη της, η οποία είναι ιδιαίτερα έντονη στην περιοχή της Μεσογείου, είναι υπεύθυνη για το 23% της υποβάθμισης των εδαφών στην Ευρώπη (RCEP, 1996). Ακόμη, οι περιοχές της Μεσογείου είναι εξαιρετικά επιρρεπείς και στη διάβρωση εφόσον υποβάλλονται σε περιόδους ξηρασίας μεγάλης διάρκειας τις οποίες ακολουθούν έντονα ξεσπάσματα βροχοπτώσεων που προκαλούν διάβρωση καθώς πέφτουν στις απόκρημνες πλαγιές εύθραυστου λεπτόκοκκου εδάφους (Grimm et al., 2002). Το 75% της περιοχής της Μεσογείου παρουσιάζει χαμηλά (3.4%) ή πολύ χαμηλά (1.7%) ποσοστά οργανικής ύλης (Van-Camp et al., 2004). Αξιοσημείωτο είναι ότι οι αγρονόμοι θεωρούν ότι εδάφη με οργανική ύλη μικρότερη από το ποσοστό 1.7% βρίσκονται στο στάδιο της προ-ερημοποίησης. Η διάβρωση, η μείωση της οργανικής ύλης, η μείωση της βιοποικιλότητας και η συμπίεση του εδάφους αποτελούν αλληλο-συσχετιζόμενες απειλές των λειτουργιών του εδάφους που ζημιώνουν την γονιμότητα του και το καθιστούν ευαίσθητο στην ερημοποίηση (COM (2002) 179), με συνέπειες σχετικά με την ασφάλεια και διασφάλιση της ποιότητας των τροφίμων, τις κλιματικές αλλαγές, την ποιότητα του νερού, και την οικονομία (Lal, 2004), απειλώντας εν τέλει τη βιώσιμη ανάπτυξη (COM (2001) 264).

2.4 Αναγκαία η αλλαγή των πρακτικών διαχείρισης του εδάφους

Έχει πλέον αναγνωριστεί ότι η τρέχουσα διαχείριση των εδαφών είναι μη βιώσιμη και απειλεί το μέλλον της ανθρωπότητας και ολόκληρης της βιόσφαιρας. Στα επόμενα 20-50 έτη, οι πιέσεις στις λειτουργίες και υπηρεσίες που προσφέρουν τα εδάφη προβλέπεται να αυξηθούν, λόγω των κλιματικών αλλαγών (ξηρασίες, ακραία γεγονότα βροχοπτώσεων) και τις ανταγωνιστικές απαιτήσεις των συστημάτων παραγωγής να παρέχουν τρόφιμα, βιοκαύσιμα και ξυλεία. Η μετατροπή καλλιεργήσιμων εκτάσεων σε λειμώνες, θαμνότοπους και δάση φαίνεται ότι δεσμεύει άνθρακα στα εδάφη (Guo and Gifford, 2002), γεγονός το οποίο πρωτίστως αποδίδεται στο σωματιδιακό υλικό (POM) το οποίο βρίσκεται στο επιφανειακό έδαφος (Potter and Derner, 2006). Χρειάζεται, ωστόσο, ο διπλάσιος χρόνος για να αποκατασταθεί η ποσότητα του άνθρακα σε λειμώνες που δημιουργήθηκαν ύστερα από παύση καλλιέργειας από όσος χρόνος χρειάζεται ώστε να χαθεί η ίδια ποσότητα άνθρακα ύστερα από την εκκίνηση καλλιέργειας του εδάφους, όπως έχουν αναφέρει η Soussana et al. (2004). Θεωρητικά, το μέγεθος της δυνητικής αύξησης του οργανικού υλικού του εδάφους θα έπρεπε να είναι ισοδύναμο με την ιστορική ποσότητα του άνθρακα που έχει χαθεί. Παρόλα αυτά, αυτό είναι απίθανο, γιατί όπως πρότεινε και ο Lal (2004a) η αύξηση του άνθρακα στα αγροτικά και υποβαθμισμένα εδάφη είναι μόνο 50 με 66% της ιστορικής ποσότητας άνθρακα που έχει χαθεί, επειδή πρέπει να ληφθούν υπόψη οι αναντικατάστατες ελλείψεις της μάζας του ορυκτού εδάφους (εξαιτίας της διάβρωση).

Ο Lal (2002) υποστήριξε ότι ενώ η ανάπτυξη των δασών θεωρείται η πιο αποδοτική επιλογή για την απορρόφηση των αερίων θερμοκηπίου για πάνω από 25-30 χρόνια, η συσσώρευση του άνθρακα στα γεωργικά εδάφη δεν συμβάλει μόνο στη συσσώρευση του αέριου C που συνευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλά επίσης συμβάλει στην ενίσχυση της ποιότητας του εδάφους και στην αγροτική παραγωγικότητα. Ενδεδειγμένες πρακτικές διαχείρισης της γης όπως είναι η βιολογική και ολοκληρωμένη γεωργία ή πρακτικές εκτατικής γεωργίας σε ορεινές περιοχές μπορούν να διατηρούν και να βελτιώνουν την οργανική ύλη στο έδαφος και να συμβάλουν επομένως και στην πρόληψη κατολισθήσεων και στον μετριασμό των κλιματικών αλλαγών (COM(2006)231). Ο Lal (2002) υποστήριξε ότι με την υιοθέτηση ‘σωστών’ αγροτικών πρακτικών, το έδαφος μπορεί να επανασυσσωρεύσει έως και το 60-70% του οργανικού υλικού που είχε χαθεί (Krull et al., 2004). Πρέπει όμως και να σημειώσουμε πως η συσσώρευση άνθρακα στα αγροτικά εδάφη εξαρτάται και από ποικιλία παραγόντων όπως τα υπάρχοντα επίπεδα C στο έδαφος, ο τύπος του εδάφους, το κλίμα και οι πρακτικές διαχείρισης (Smith et al., 2007). Επειδή το SOC αποτελείται από αρκετές δεξαμενές οι οποίες δρουν με διαφορετικό τρόπο και σε ορισμένη χρονική κλίμακα, η αξία του SOC δε μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας απλά την αύξησή του ως μέτρο στα καλλιεργήσιμα εδάφη.

Είναι επομένως πρωταρχικής σπουδαιότητας να επαναξιολογηθούν οι πρακτικές που χρησιμοποιούνται στη γεωργία και να αναπτυχθούν εναλλακτικά βιώσιμα συστήματα διαχείρισης των γεωργικών εδαφών που θα προστατεύουν παρά θα υποβαθμίζουν τα εδάφη. Απώτερος στόχος πρέπει να είναι η προστασία και αειφόρος χρήση του εδάφους με βάση τις ακόλουθες κατευθυντήριες αρχές:

1) Πρόληψη της περαιτέρω υποβάθμισης του εδάφους και διατήρηση των λειτουργιών του. Όταν το έδαφος χρησιμοποιείται και οι λειτουργίες του αξιοποιούνται, πρέπει να αναλαμβάνεται δράση σχετικά με τη χρήση του εδάφους και τα διαχειριστικά σχήματα, και όταν το έδαφος λειτουργεί ως καταβόθρα/αποδέκτης των αποτελεσμάτων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων ή περιβαλλοντικών φαινομένων, πρέπει να αναλαμβάνεται δράση στην πηγή (COM(2006)231).

2) Αποκατάσταση υποβαθμισμένων εδαφών σε τέτοιο βαθμό λειτουργικότητας ώστε να εξυπηρετούνται τρέχουσες αλλά και μελλοντικές χρήσεις, ενώ παράλληλα να συνεκτιμώνται οι επιπτώσεις ως προς το κόστος αποκατάστασης του εδάφους (COM(2006)231).

Το κόστος της υποβάθμισης του εδάφους μπορεί να ανέλθει και στα 38€ δις ετησίως (COM(2006)231). Οι Antle et al. (2002) από τη μεριά τους υπολόγισαν πως προσεγγιστικά το 49% της αγροτικής συσσώρευσης του άνθρακα μπορεί να επιτευχθεί υιοθετώντας διατήρηση του οργώματος και διαχείριση των υπολειμμάτων, 25% με αλλαγή των πρακτικών καλλιέργειας, 13% με αποκατάσταση εδαφών και 7% με αλλαγή στη χρήση γης και καλύτερη διαχείριση του αρδευτικού νερού. Βέβαια, για το εκάστοτε σενάριο μέτρων προστασίας του εδάφους πρέπει να έχουμε κατά νου ότι το εκτιμώμενο όφελος σαφώς υπερβαίνει το κόστος, κατά μείζονα λόγο αφού δε συνεκτιμώνται πολλά περιβαλλοντικά οφέλη που συνδέονται με τις λειτουργίες του εδάφους, κυρίως η διατήρηση της βιοποικιλότητας και η εξασφάλιση των κύκλων των αερίων και των θρεπτικών συστατικών (COM(2006)231). Εν κατακλείδι και συνοψίζοντας, τα πλεονεκτήματα της αύξησης των αποθεμάτων του SOC υιοθετώντας 'σωστές' πρακτικές διαχείρισης εκτείνονται περαιτέρω από το πολυσυζητημένο σύστημα προσρόφησης των αερίων θερμοκηπίου. Στην πραγματικότητα, τα άμεσα πλεονεκτήματα της αυξημένης περιεκτικότητας σε SOC περιλαμβάνουν αυξημένη και πιο ποιοτική αγροτική παραγωγή, αειφορία, και πάνω από όλα, αναβαθμισμένη ποιότητα εδάφους (Uta Stockmann et al., 2011).

2.5 Μοντέλα προσομοίωσης του άνθρακα

Από όλη την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι είναι επείγουσα η ανάγκη για εύρεση εργαλείων και μεθοδολογιών που θα είναι σε θέση να δώσουν αξιόπιστες προβλέψεις για τις επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών και τη πρακτικές αποκατάστασης των εδαφών, ώστε να αξιολογηθούν οι εναλλακτικές λύσεις. Τα μοντέλα προσομοίωσης της οργανικής ύλης έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως ως εργαλείο για την πρόβλεψη της περιεκτικότητας των εδαφών σε οργανικό άνθρακα, σε διαφορετικούς τύπους εδαφών, καλλιεργητικές πρακτικές και κλιματικές συνθήκες όπως επίσης και για να προβλέψουν τις επιπτώσεις των αλλαγών χρήσεις γης και των κλιματικών αλλαγών (Battle-Aguilar et al 2010). Τα τελευταία χρόνια σε πολλές εργασίες έχει πραγματοποιηθεί ανασκόπηση της μοντελοποίησης τόσο του άνθρακα όσο και του αζώτου στα χερσαία οικοσυστήματα (π.χ. Falloon and Smith, 2000, Shibu et al., 2006, Minasny et al., 2008, Manzoni and Porporato, 2009, Battle-Aguilar et al., 2010, Adams et al., 2011, Nikolaidis and Bidoglio, 2011).

Τα 'process-oriented' μοντέλα έχουν προτιμηθεί στην επιστημονική βιβλιογραφία σε σχέση με τα 'organism-oriented' μοντέλα και τα 'cohort' μοντέλα, καθώς απαιτούν λιγότερα δεδομένα εισαγωγής, περιέχουν λιγότερες παραμέτρους προς ρύθμιση, έχουν μικρότερο υπολογιστικό κόστος, και για άλλους λόγους που αναφέρονται από τους Adams et al (2011) και τους Post et al (2007). Γενικά, τα μοντέλα προσομοίωσης του κύκλου του άνθρακα στα εδάφη περιλαμβάνουν πολλές δεξαμενές άνθρακα (π.χ. του χούμου ή του σωματιδιακού άνθρακα) με διαφορετικά χαρακτηριστικά τα οποία αποδομούνται με κινητική πρώτου βαθμού. Τα 'process-oriented' μοντέλα που συμπεριλαμβάνουν με μεγάλη λεπτομέρεια και πολυπλοκότητα τις αληλεπιδράσεις των μικροβιακών πληθυσμών και την ανάπτυξη των φυτών, απαιτούν περισσότερα δεδομένα πεδίου για την εφαρμογή τους και εισάγουν μεγαλύτερο βαθμό λάθους και αβεβαιότητας (Smith et al., 1997). Το RothC, το Century, και το DNDC είναι τα πιο διαδεδομένα 'process-oriented' μοντέλα.

Η ικανότητα πρόβλεψης των μοντέλων οργανικού άνθρακα μπορεί να ενισχυθεί μέσω α) της βαθμονόμησης των σταθερών του ρυθμού αποδόμησης και β) με τη χρήση δεδομένων μετρούμενων στο πεδίο σχετικά με το υπολειμματικό φυτικό υλικό που εισέρχεται στο έδαφος και τις αρχικές συνθήκες, δηλαδή την κατανομή του άνθρακα σε διάφορες δεξαμενές που σχετίζονται με τις δεξαμενές προσομοίωσης του μοντέλου, με χρήση μεθόδων διαχωρισμού της οργανικής ύλης σε διάφορα φυσικά κλάσματα (Krull et al., 2005, Zimmermann et al., 2007). Οι προσομοιώσεις του άνθρακα με μοντέλα συνήθως δεν λαμβάνουν υπόψη τους τις έμφυτες αβεβαιότητες που οφείλονται στα δεδομένα εισαγωγής, στις αρχικές συνθήκες, καθώς επίσης και στις παραμέτρους του μοντέλου, με ελάχιστες εξαιρέσεις (Juston et al., 2010, Paul et al., 2003). Ωστόσο, η περιπλοκότητα των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των παραμέτρων του μοντέλου του κύκλου του άνθρακα και των δεδομένων εισαγωγής, κάνουν επιτακτική την ανάγκη δημιουργίας προσομοιώσεων βάσει των οποίων θα εκτιμηθεί η μοναδικότητα της λύσης και η αβεβαιότητα εξαιτίας της δομής του μοντέλου, των αρχικών συνθηκών, των παραμέτρων του μοντέλου και των δεδομένων εισαγωγής (Stamati et al., 2012).

2.5.1 Το μοντέλο άνθρακα RothC

Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκε το 'process-oriented' μοντέλο RothC το οποίο και περιγράφεται παρακάτω. Το RothC-26.3 είναι ένα μοντέλο για τον κύκλο του οργανικού άνθρακα σε μη κορεσμένα από νερό επιφανειακά εδάφη, το οποίο λαμβάνει υπόψη του το ρυθμό αποδόμησης, τη θερμοκρασία, την υγρασία του εδάφους και τη φυτική κάλυψη του εδάφους. Με τη βοήθεια αυτού του μοντέλου μπορούν να γίνουν υπολογισμοί σε μία κλίμακα από λίγα χρόνια έως και λίγους αιώνες (Stamati et al., 2012).Αρχικά, το μοντέλο RothC-26.3 και οι παράμετροί του ορίστηκαν και αναπτύχθηκαν έτσι ώστε να προσομοιώνεται ο κύκλος του οργανικού άνθρακα (C) σε καλλιεργήσιμα επιφανειακά εδάφη, και βασίστηκε σε δεδομένα από τα μακροπρόθεσμα πειράματα στην περιοχή του Rothamsted (Long Term Field Experiment) από την οποία πήρε και το όνομά του. Αργότερα, το μοντέλο αναβαθμίστηκε έτσι ώστε να μοντελοποιεί τον κύκλο του άνθρακα και σε λειμώνες και σε δασικές εκτάσεις και έτσι ώστε να λειτουργεί και σε διαφορετικά εδάφη και σε περιοχές με διαφορετικό κλίμα. Θα πρέπει να χρησιμοποιείται με επιφυλάξεις σε μεγαλύτερα βάθη εδαφών, σε εδάφη που έχουν αναπτυχθεί από πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα (αλλά βλέπε Parshotam et al., 1995, Tateet al.,, 1996 και Saggar et al., 1996), σε εδάφη με τούνδρα και τάιγκα, ενώ δε θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί καθόλου σε εδάφη που είναι μονίμως κορεσμένα με νερό.

Τα δεδομένα εισαγωγής που χρειάζονται για την εκκίνηση του συγκεκριμένου μοντέλου είναι λίγα και μάλιστα εύκολα ανακτήσιμα:

1) Η μηνιαία βροχόπτωση(mm).

2) Η μηνιαία εξάτμιση(mm).

Χρησιμοποιούνται η βροχόπτωση και η εξάτμιση για να υπολογιστεί το έλλειμμα της υγρασίας στα επιφανειακά εδάφη (TSMD), καθώς είναι ευκολότερη αυτή η διαδικασία από το να παίρνουμε μηνιαίες μετρήσεις για το πραγματικό έλλειμμα νερού στα επιφανειακά εδάφη. Ωστόσο, εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για την εξάτμιση, μπορεί να υπολογιστεί η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή με αρκετή ακρίβεια από τη συλλογή του Müller (1982) από μετεωρολογικά δεδομένα για τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο. Θα πρέπει, βέβαια, να γίνεται επιλογή τοποθεσίας από τη συλλογή του Müller η οποία να είναι όσο το δυνατόν παρόμοια κλιματολογικά με την τοποθεσία η οποία ερευνάται. Στη στήλη 14, με επικεφαλίδα 'Μέση δυνητική εξάτμιση', στους πίνακες του Müller στην πραγματικότητα δίνεται η υπολογισμένη μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί η 'Μέση δυνητική εξατμισοδιαπνοή' από τους πίνακες του Müller, πρέπει να γίνει μετατροπή των τιμών αυτών σε ανοιχτή εξάτμιση μετά από διαίρεση τους με το 0,75. Αυτή η διαδικασία είναι μέγιστης σημασίας επειδή το μοντέλο είναι επί του παρόντος προγραμματισμένο να τρέχει για δεδομένα εξάτμισης, τα οποία πολλαπλασιάζονται στο μοντέλο με το 0,75 ώστε να δίνουν την εξατμισοδιαπνοή. Δηλαδή, εάν χρησιμοποιούνται δεδομένα εισαγωγής για το μοντέλο από τους πίνακες του Müller, θα πρέπει να γνωρίζουμε ότι: Εξάτμιση='Μέση πιθανή εξατμισοδιαπνοή /0,75.

3) Η μέση τιμή της μηνιαίας θερμοκρασίας του αέρα (°C).

Επειδή ακριβώς δεδομένα για τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι πιο εύκολο να βρεθούν για τις περισσότερες τοποθεσίες, χρησιμοποιείται η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας αντί αυτής του εδάφους. Για το Rothamsted, η μηνιαία θερμοκρασία της ατμόσφαιρας παρουσιάζει ικανοποιητικά τη μέση μηνιαία θερμοκρασία του επιφανειακού εδάφους, δείχνοντας στα 20 cm εδάφους μια διαφορά μόνο +1°C της ελάχιστης ετήσιας θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας και -1°C αντίστοιχα της μέγιστης ετήσιας.

4) Το περιεχόμενο του εδάφους σε άργιλο (ως ποσοστό).
Το περιεχόμενο του εδάφους σε άργιλο χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί πόσο νερό μπορεί να κατακρατηθεί στο έδαφος διαθέσιμο για τα φυτά. Επίσης, η άργιλος είναι πολύ σημαντική παράμετρος γιατί επηρεάζει τον τρόπο που το οργανικό υλικό αποσυντίθεται.

5) Μία εκτίμηση της αποδομησιμότητας του εισερχόμενου φυτικού υλικού, ο λόγος δηλαδή DPM/RPM.

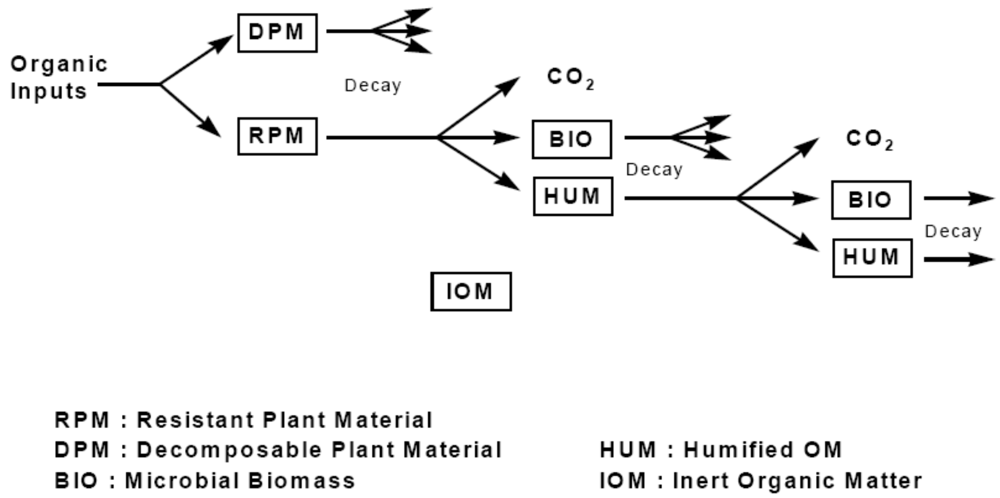
6) Η κάλυψη του εδάφους, αν δηλαδή το έδαφος είναι γυμνό ή καλυμμένο με βλάστηση έδαφος σε ένα συγκεκριμένο μήνα.
Είναι απαραίτητο να είναι γνωστό εάν το έδαφος είναι καλυμμένο με βλάστηση ή όχι, επειδή η αποδόμηση έχει βρεθεί ότι είναι γρηγορότερη σε γυμνό έδαφος από ότι σε καλλιεργήσιμο έδαφος, ακόμη και όταν το καλλιεργήσιμο έδαφος δεν αφήνεται να ξηραθεί (Jenkinson et al., 1987, Sommers et al., 1981, Sparling et al., 1982).

7) Η μηνιαία εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων (t C ha^{-1}).
Η εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων είναι η ποσότητα του άνθρακα που εισάγεται στο έδαφος κάθε μήνα (t C ha-1), περιλαμβάνοντας και τον άνθρακα που απελευθερώνεται από τις ρίζες των φυτών κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους. Καθώς αυτή η εισαγωγή είναι σπανίως γνωστή, το μοντέλο το τρέχουμε πολύ πιο συχνά ‘αντίστροφα’, παράγοντας τα δεδομένα εισαγωγής από γνωστό έδαφος, γνωστή τοποθεσία και γνωστά δεδομένα καιρού.

8) Η μηνιαία εισαγωγή κοπριάς (FYM) (t C ha^{-1}), εάν υπάρχει.
Η ποσότητα της FYM (t C ha^{-1}) που τοποθετείται στο έδαφος, εάν τοποθετείται, περιλαμβάνεται στο μοντέλο ξεχωριστά, επειδή η FYM έχει ελαφρώς διαφορετική συμπεριφορά στο έδαφος από ότι έχουν τα φρέσκα φυτικά υπολείμματα.

9) Βάθος του εδαφικού στρώματος που προσομοιώνεται (cm).

Στο μοντέλο γίνονται υπολογισμοί με μηνιαίο χρονικό βήμα για 5 δεξαμενές άνθρακα οι οποίες είναι το εύκολα αποδομήσιμο φυτικό υλικό (DPM, decomposable plant material), το ανθεκτικό φυτικό υλικό (RPM, resistant plant material), η μικροβιακή βιομάζα (BIO, biomass), το χουμοποιημένο οργανικό υλικό (HUM, humus) και μία μικρή ποσότητα αδρανούς οργανικού υλικού (IOM, inert organic matter). Κάθε δεξαμενή αποδομείται βάσει κινητικής εξίσωσης πρώτης τάξεως, ενώ η ενότητα του IOM είναι ανθεκτική στην αποδόμηση. Η δομή του μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Δομή του μοντέλου Rothamsted Carbon Model (από τους Coleman and Jenkinson, RothC-26.3, Model description and users guide).

Ο εισερχόμενος φυτικός άνθρακας χωρίζεται σε DPM και RPM, ανάλογα με το λόγο DPM/RPM του συγκεκριμένου εισαγόμενου φυτικού υλικού. Για τις περισσότερες γεωργικές καλλιέργειες και τους ανεπτυγμένους λειμώνες, χρησιμοποιείται ένας λόγος DPM/RPM ίσος με 1.44, δηλαδή το 59% του φυτικού υλικού είναι DPM και το 41% είναι RPM. Για μη ανεπτυγμένους λειμώνες και θάμνους (περιλαμβάνοντας τη Σαβάννα) χρησιμοποιείται ένας λόγος 0.67. Για μία περιοχή με φυλλοβόλα φυτά ή για μία τροπική δασώδη περιοχή χρησιμοποιείται ένας λόγος DPM/RPM ίσος με 0.25, έτσι ώστε το 20% είναι DPM και το 80% είναι RPM. Η FYM, από την άλλη μεριά, θεωρείται ότι είναι περισσότερο αποδομήσιμη από ότι το απλό φυτικό υλικό καλλιεργειών και χωρίζεται με τον ακόλουθο τρόπο: DPM 49%, RPM 49% και HUM 2%. Όλο το εισερχόμενο οργανικό υλικό περνά από τις δύο δεξαμενές, DPM και RPM μία και μόνο μία φορά. Και οι δύο, ωστόσο, αποδομούνται σε CO_2, BIO και HUM. Τα BIO+HUM που προέρχονται από φυτικό υλικό χωρίζονται ύστερα σε 46% BIO και

54% HUM και στη συνέχεια καθένα από τα δύο αποδομείται προς σχηματισμό περισσότερου CO_2, BIO και HUM. Η αναλογία στην οποία χωρίζονται σε CO_2 και σε BIO+HUM καθορίζεται από την περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο.

Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άργιλο του εδάφους, γίνεται προσαρμογή του μοντέλου με μετατροπή της αναλογίας μεταξύ των εκπομπών του CO_2 και της δημιουργίας BIO+HUM στο έδαφος κατά τη διάρκεια της αποδόμησης, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση για τον υπολογισμό του λόγου $\frac{\mathbf{CO_2}}{(\mathbf{BIO + HUM})}$:

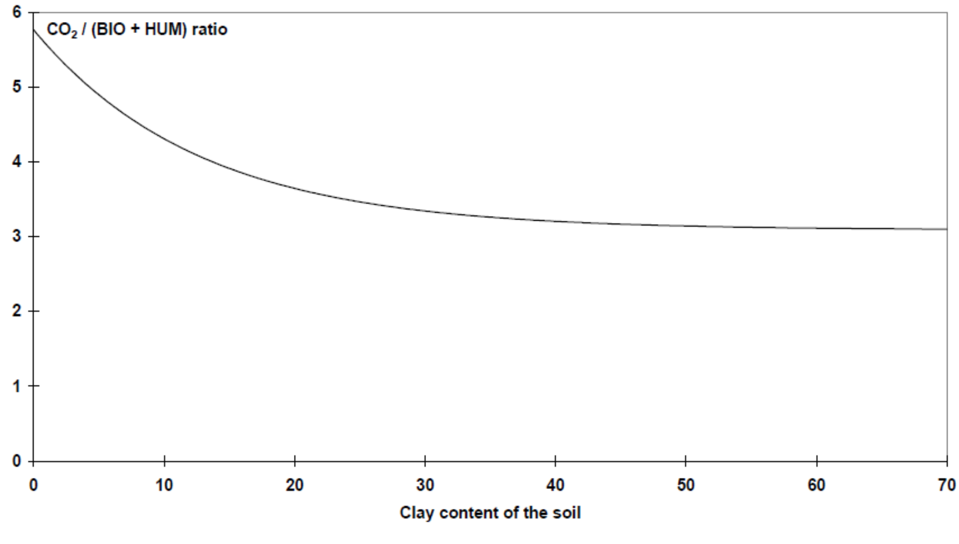
x = 1.67 (1.85 + 1.60 exp(-0.0786 %clay))

όπου *x* είναι ο λόγος $\frac{\mathbf{CO_2}}{(\mathbf{BIO + HUM})}$.

Ύστερα, ο λόγος $\frac{\mathbf{x}}{(\mathbf{x + 1})}$ αποδίδει τις εκπομπές CO_2

και ο λόγος $\frac{\mathbf{1}}{(\mathbf{x + 1})}$ είναι η σχηματισμένη ποσότητα BIO+HUM.

Στο Σχήμα 2.5 φαίνεται πώς η επί τις εκατό περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο επηρεάζει τον λόγο $\frac{\mathbf{CO_2}}{(\mathbf{BIO + HUM})}$.

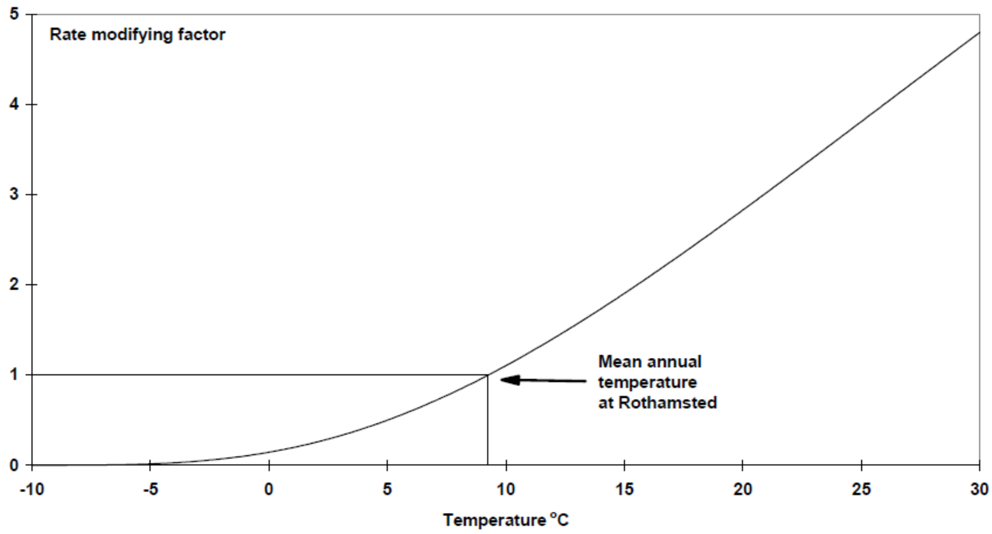


Σχήμα 2.5 Η επιρροή της αργίλου στο λόγο του CO_2 που απελευθερώνεται προς την ποσότητα (BIO +HUM) που δημιουργείται.

Εάν μία δεξαμενή άνθρακα (εκτός από τη δεξαμενή IOM, που δεν αποδομείται) περιέχει Y t C ha^{-1}, ο άνθρακας αυτός μειώνεται σε Y e^{-abckt} t C ha^{-1} στο τέλος του μήνα.

Όπου, α είναι ο παράγοντας της μετατροπής του ρυθμού λόγω της θερμοκρασίας
b είναι ο παράγοντας της μετατροπής του ρυθμού λόγω της υγρασίας
c είναι ο παράγοντας της μετατροπής του ρυθμού λόγω της κάλυψης ή όχι του εδάφους με βλάστηση
k είναι η σταθερά του ρυθμού αποδόμησης για τη συγκεκριμένη δεξαμενή
t είναι 1/12, εφόσον το k βασίζεται σε έναν ετήσιο ρυθμό αποδόμησης
Έτσι, $Y(1-e^{-abckt})$ είναι η ποσότητα του άνθρακα που αποδομείται σε μία δεξαμενή άνθρακα σε ένα συγκεκριμένο μήνα. Οι προεπιλεγμένες τιμές των σταθερών αποδόμησης (k), σε $years^{-1}$, για κάθε δεξαμενή είναι: DPM: 10.0, RPM: 0.3, BIO: 0.66, HUM: 0.02. Αυτές οι τιμές έχουν προκύψει από τη ρύθμιση του μοντέλου με δεδομένα από κάποια από τα μακροπρόθεσμα πειράματα στο Rothamsted (Jenkinson et al., 1987, Jenkinson et al., 1992) και κανονικά δε τροποποιούνται όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο.

Ο παράγοντας της μετατροπής του ρυθμού λόγω της θερμοκρασίας (α) δίνεται από τον τύπο: $\alpha = \dfrac{47.9}{1 + e^{\left(\frac{106}{T+18.3}\right)}}$, όπου T είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα (°C). Η γραφική παράσταση που προκύπτει από την παραπάνω σχέση δίνεται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6 Ο παράγοντας της μετατροπής του ρυθμού λόγω της θερμοκρασίας.

Η τιμή του παράγοντα της μετατροπής του ρυθμού λόγω της υγρασίας (b) υπολογίζεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Το μέγιστο της τιμής του ελλείμματος της υγρασίας του επιφανειακού εδάφους (Topsoil moisture deficit, TSMD) για στρώμα συγκεκριμένου βάθους εδάφους, δηλαδή 0-23cm, πρώτα υπολογίζεται από τον τύπο:

Μέγιστο TSMD = - (20% +1.3(%clay)- 0.01(%clay)^2)

Έτσι, για το Rothamsted (%clay=23.4), το μέγιστο TSMD = - 44.94

Για εδαφικό στρώμα με διαφορετικό πάχος, το μέγιστο TSMD το οποίο έχει υπολογιστεί με τον παραπάνω τρόπο, διαιρείται με 23 και στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με το πραγματικό πάχος, σε cm. Ακολούθως, το συσσωρευμένο TSMD για το συγκεκριμένο στρώμα εδάφους υπολογίζεται από τον πρώτο μήνα, όπου το 0.75*(εξάτμιση) υπερβαίνει τη βροχόπτωση ώσπου να φτάσει το μέγιστο TSMD. Το TSMD παραμένει σταθερό μέχρι η βροχόπτωση να αρχίσει να υπερβαίνει το 0.75*(εξάτμιση) και επομένως το έδαφος να αρχίσει να υγραίνεται ξανά.

Τελικώς, ο παράγοντας της μετατροπής του ρυθμού λόγω της υγρασίας (b) που χρησιμοποιείται για κάθε μήνα, υπολογίζεται από τον τύπο:

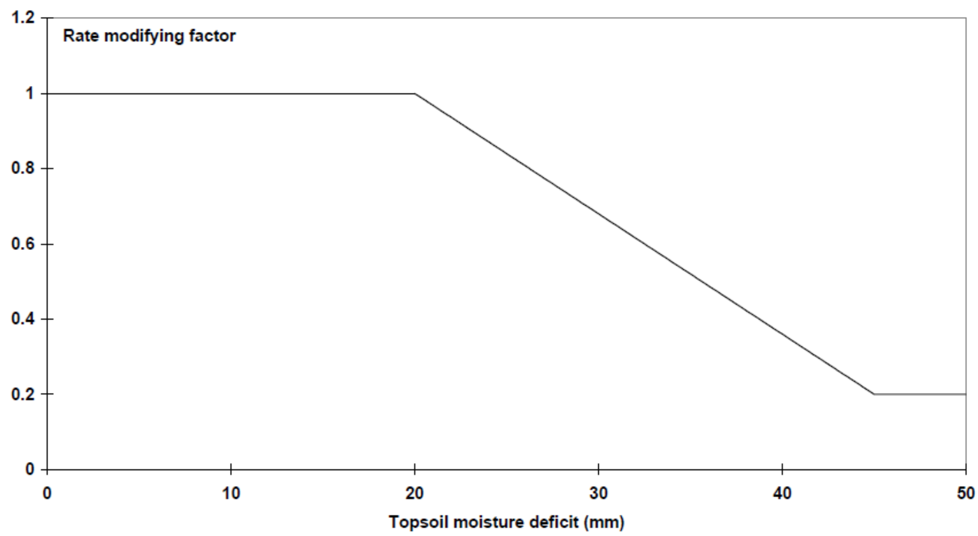
Εάν το συσσωρευμένο έλλειμμα (accumulated. TSMD) < 0.444 max. TSMD,

b = 1.0

διαφορετικά,

$$b = 0.2 + (1.0-0.2) * \frac{(max.TSMD - acc.TSMD)}{(max.TSMD 0.444\ max.TSMD)}$$

Η εφαρμογή των παραπάνω τύπων δίνει τη μορφή διαγράμματος που φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 Ο παράγοντας της μετατροπής του ρυθμού λόγω της υγρασίας.

Σημειώνεται, ωστόσο, ότι θα πρέπει οπωσδήποτε η εισαγωγή δεδομένων στην εκκίνηση της μοντελοποίησης να ξεκινήσει από μήνα στον οποίο το έδαφος είναι κορεσμένο σε νερό (field capacity). Για παράδειγμα, ο υπολογισμός του παράγοντα b στο παραπάνω σχήμα ξεκινά από την 1^{η} Ιανουαρίου, όπου το έδαφος υποτίθεται ότι είναι κορεσμένο σε νερό. Αντίστοιχα, στο Νότιο Ημισφαίριο, τα δεδομένα εισαγωγής για τον καιρό θα πρέπει να ξεκινούν από τον Ιούλιο όπου το έδαφος είναι υγρό και όπου στα δεδομένα εξόδου του μοντέλου ο Ιούλιος φαίνεται σα να είναι ο Ιανουάριος του Βόρειου Ημισφαιρίου.

- <u>Έλλειμμα εδαφικής υγρασίας σε γυμνό από βλάστηση έδαφος (BareSMD)</u>

Σημειώνεται ότι το μέγιστο TSMD που υπολογίζεται με τον παραπάνω τρόπο αναφέρεται σε περιοχές με ενεργή αναπτυσσόμενη βλάστηση. Εάν το έδαφος είναι γυμνό κατά τη διάρκεια παραδείγματος χάρη ενός συγκεκριμένου μήνα, αυτό το μέγιστο διαιρείται με 1.8 και δίνει το BareSMD, για να δείξει τη μειωμένη εξάτμιση από ένα γυμνό έδαφος. Όταν το έδαφος είναι γυμνό δεν είναι δυνατόν να ξηραθεί περισσότερο από το BareSMD, εκτός εάν το συσσωρευμένο TSMD είναι ήδη μικρότερο από το BareSMD όπου σε αυτή την περίπτωση δε μπορεί να ξηραθεί περισσότερο από το TSMD.

Η τιμή του παράγοντα της μετατροπής του ρυθμού λόγω της κάλυψης ή όχι του εδάφους με βλάστηση (c) είναι:
εάν στο έδαφος υπάρχει βλάστηση *c= 0.6*
εάν το έδαφος είναι γυμνό *c=1.0*

Η ηλικία του IOM έχει προεπιλεγεί ότι είναι 50.000 χρόνια, πράγμα το οποίο ουσιαστικά δείχνει ότι δεν περιέχει καθόλου ^{14}C ($\Delta^{14}C$= -998.0) και ότι η ηλικία του αναφέρεται περισσότερο στην γεωλογία παρά στην εδαφολογία. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις για το ραδιενεργό άνθρακα, μπορούμε να θέσουμε μία τιμή για το IOM χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση η οποία αποτελεί μια πολύ προσεγγιστική εκτίμηση και αναφέρεται μόνο σε επιφανειακά εδάφη.

$IOM = 0.049*TOC^{1.139}$

Όπου, TOC είναι ο ολικός οργανικός άνθρακας (Total organic carbon), t C ha^{-1}

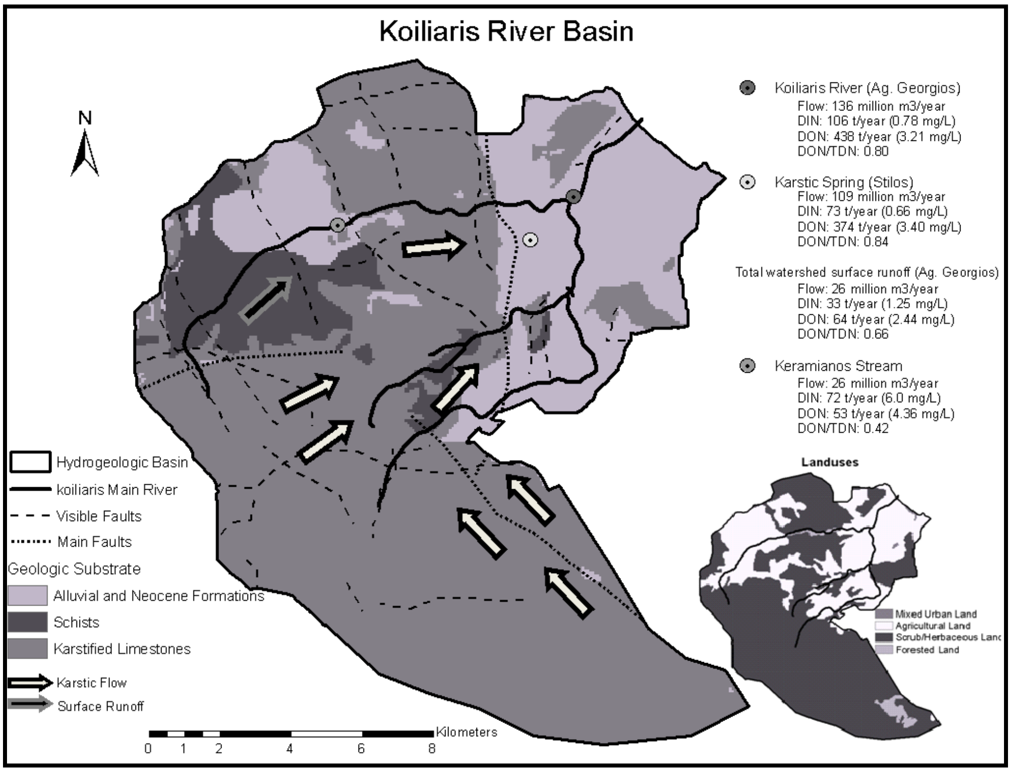
IOM είναι το αδρανές οργανικό υλικό (Inert organic matter), t C ha^{-1}

(Coleman and Jenkinson, 1999

3. Μεθοδολογία

3.1 Περιοχή μελέτης

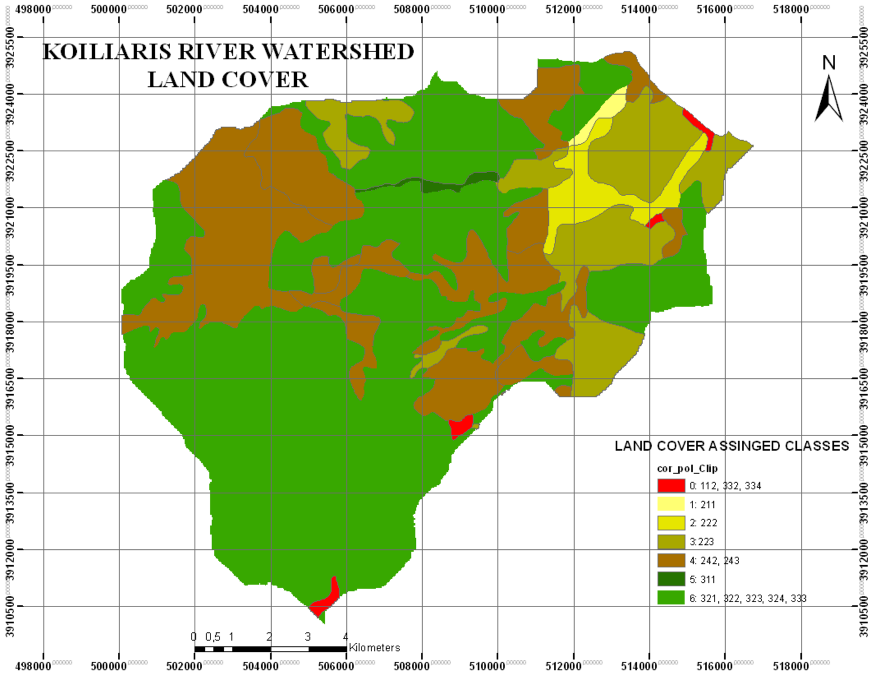
Η πρόβλεψη των αλλαγών στην περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ύλη λόγω αλλαγής χρήσης γης, κλιματικών αλλαγών και προσθήκης εδαφοβελτιωτικών έγινε για την περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη, στο νομό Χανίων Κρήτης η οποία βρίσκεται 25 km ανατολικά από την πόλη των Χανίων (005-12-489E, 039-22-112N) και καλύπτει συνολική έκταση 130 km^2. Το κλίμα της περιοχής είναι εύκρατο, Μεσογειακό και δέχεται βροχές και χιόνια κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ χαρακτηρίζεται από ξηρά και ζεστά καλοκαίρια κατά τα οποία η εξάτμιση υπερβαίνει τη βροχόπτωση καταλήγοντας σε αξιοσημείωτες ελλείψεις νερού στην περιοχή. Η κύρια παροχή νερού που σχηματίζει τον ποταμό προέρχεται από τα Λευκά Όρη, μέσα από το καρστικό σύστημα που καταλήγει στις πηγές του Στύλου, του Ζούρβου και των Αρμένων, αλλά και άλλες μικρότερες πηγές (Χάρτης 3.1). Η περιοχή αυτή είναι ένα διεθνές Παρατηρητήριο Εδαφών όσον αφορά την κρίσιμη ζώνη του εδάφους, και αποτελείται από αλλουβιακές εναποθέσεις και καρστικούς σχηματισμούς ασβεστόλιθων και δολομιτών (Nikolaidis, 2011). Η έκτασή της περικλείει υψομετρική διαφορά 2120 m MSL η οποία μαζί με το ημιάγονο έδαφος συνεπάγεται και διαφορετικές κλιματικές συνθήκες σε αυτή την έκταση (Nikolaidis, 2011), ενώ το έδαφός της χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές διαφορετικές λιθολογίες. Οι λιθολογίες αυτές είναι οι Μάργες, οι Ασβεστόλιθοι Τρυπαλίου και οι Σχιστόλιθοι. Η βλάστηση της περιοχής αποτελείται κυρίως από καλλιεργήσιμες εκτάσεις με ελιές, πορτοκαλιές, λεμονιές, αμπέλια και λαχανικά (υψόμετρο 9-383m) και κατά μικρότερο ποσοστό από θαμνώδεις εκτάσεις πάνω σε ασβεστόλιθους (υψόμετρο 592-1098 m), από τις οποίες θρέφονται εντατικά κατσίκες και πρόβατα. Στον Πίνακα 3.1 καθώς και στο Χάρτη 3.2 φαίνεται η κάλυψη του εδάφους. Χωρίζεται σε τρεις υψομετρικές ζώνες, αυτής του χαμηλού υψομέτρου (0-200 m), αυτής του μεσαίου υψομέτρου- ημιορεινής (200-800 m) και αυτής του υψηλού υψομέτρου- ορεινής (>800 m), οι οποίες φαίνονται στο Χάρτη 3.3. Τα δείγματα που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη ήταν από την ημιορεινή- μεσαίου υψομέτρου ζώνη.



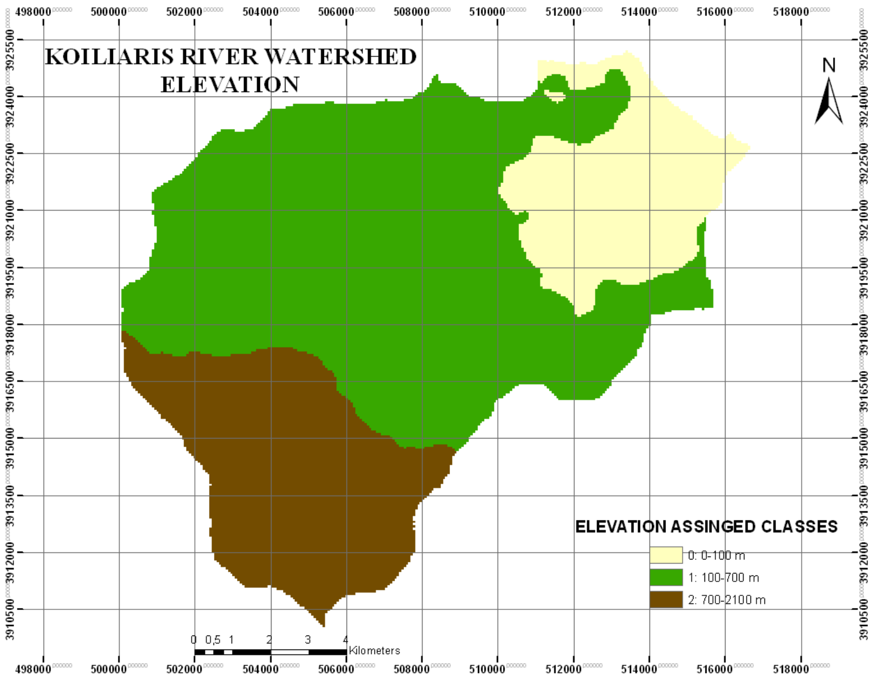
Χάρτης 3.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί, χρήσεις γης, υδρολογική ροή και ροή θρεπτικών στη λεκάνη απορροής του ποταμού Κοιλιάρη (Stamati, 2012).

Πίνακας 3.1 Περιγραφή των επιπέδων κάλυψης της γης σύμφωνα με τη βάση δεδομένων CLC 2000 και καταχωρήσεις κατηγοριών για τους τύπους επικάλυψης της γης (Stamati, 2012).

Co Leve	Label Level1	Label Level2	Label Level3	Assigned Class Code
11	Artificial surfaces	Urban fabric	Discontinuous urban fabric	0
21	Agricultural areas	Arable land	Non-irrigated arable land	1
22		Permanent crops	Fruit trees and berry plantations	2
22			Olive groves	3
24		Heterogeneous agricultural areas	Complex cultivation patterns	4
24			Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	
31	Forest and semi natural areas	Forests	Broad-leaved forest	5
32		Scrub and/or herbaceous vegetation associations	Natural grasslands	6
32			Moors and heathland	
32			Sclerophyllous vegetation	
32			Transitional woodland-shrub	
33		Open spaces with little or no vegetation	Bare rocks	0
33			Sparsely vegetated areas	6
33			Burnt areas	0



Χάρτης 3.2 Ταξινόμηση των κατηγοριών της επικάλυψης γης (τα ψηφιακά δεδομένα που τέθηκαν έχουν προέλθει από τη βάση δεδομένων CLC 2000 (Corine Land Cover 2000) η οποία είναι διαθέσιμη από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος) (Stamati, 2012).



Χάρτης 3.3 Ταξινόμηση της χαρτογράφησης του περιγράμματος του υψομέτρου (τα ψηφιακά δεδομένα που τέθηκαν έχουν προέλθει από τη βάση δεδομένων της περιοχής της Κρήτης. Τα αντίστοιχα δεδομένα αντλούνται από τα τοπογραφικά διαγράμματα (1:50000 κλίμακα) της Γεωγραφικής Υπηρεσίας του Στρατού) (Stamati, 2012

3.2 Τα βήματα που ακολουθήθηκαν

Έγινε προσομοίωση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων για καλλιεργήσιμα εδάφη 50 χρόνων της περιοχής μελέτης τα οποία αρχικά ήταν θαμνότοποι. Προσομοίωση της ενυπάρχουσας αβεβαιότητας λόγω των αρχικών συνθηκών, των παραμέτρων του μοντέλου και των δεδομένων εισαγωγής στο μοντέλο του κύκλου του άνθρακα. Βάσει της παραπάνω διαδικασίας να έγινε αξιολόγηση και σύγκριση ανά 20αετίες της κατάστασης του εδάφους, της τωρινής αλλά και της μέλλουσας, της περιοχής μελέτης στις τρεις διαφορετικές λιθολογίες της περιοχής σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη λόγω αλλαγής χρήσης γης κατά τα χρονικά διαστήματα 1990-2010, 2010-2030 και 2030-2050 και λόγω της παράλληλης επίδρασης των κλιματικών αλλαγών κατά τα χρονικά διαστήματα 2010-2030 και 2030-2050. Στη δεύτερη λόγω παράτασης της καλλιέργειας ήδη υποβαθμισμένων εδαφών κατά τα χρονικά διαστήματα 1990-2010, 2010-2030 και 2030-2050 και λόγω της παράλληλης επίδρασης των κλιματικών αλλαγών κατά τα χρονικά διαστήματα 2010-2030 και 2030-2050. Τέλος, και για τις δύο περιπτώσεις, κατά τα χρονικά διαστήματα 2010-2030 και 2030-2050 να γίνει αξιολόγηση της κατάστασης των εδαφών λόγω προσθήκης τριών διαφορετικών εδαφοβελτιωτικών, των 49/49/2, 30/60/10 και 10/70/20 οι αριθμοί των οποίων αντιστοιχούν στα ποσοστά των DPM/RPM/HUM.

3.3 Δειγματοληψία και μετρήσεις

Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στη μελέτη της Τασούλας 2011 σε 54 σημεία της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη. Η δειγματοληψία είχε γίνει βάσει της τυπολογίας των εδαφών και με τη βοήθεια θεματικών χαρτών GIS (γεωλογικό υπόβαθρο, τύποι εδαφών, χρήσεις γης και υψομετρική ζώνη). Ειδικότερα, για την παρούσα μελέτη, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από έξι από αυτά τα δείγματα τα οποία έχουν τα χαρακτηριστικά ότι πρώτον έχουν προέλθει από τις τρεις διαφορετικές λιθολογίες που περιγράφονται παραπάνω (δύο δείγματα από κάθε λιθολογία) και ότι δεύτερον βρίσκονται σε ίδιο περίπου υψόμετρο έτσι ώστε να έχουν εκτεθεί στις ίδιες κλιματικές συνθήκες. Για κάθε λιθολογία χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από ένα δείγμα εδάφους που καλλιεργούταν επί 50 περίπου χρόνια (cropland) και από ένα το οποίο δεν είχε καλλιεργηθεί ποτέ (shrubland). Όλες οι μετρήσεις βασίστηκαν στη διεργασία της φυσικής κλασμάτωσης. Εν συντομία μπορούμε να πούμε ότι τα εδάφη χωρίστηκαν σε πέντε κλάσματα συσσωματωμάτων ανθεκτικών στο νερό (water stable aggregate, WSA) βάσει της διαδικασίας που περιγράφει ο Elliott (1986) και είναι τα εξής: i) μεγάλα μάκρο-συσσωματώματα (>2000μm), ii) μεσαία μάκρο-συσσωματώματα (1000-2000μm), iii) μικρά μάκρο-συσσωματώματα (250-1000μm), iv) μίκρο-συσσωματώματα (53-250μm), και v) μίκρο-συσσωματώματα και υλικά μεγέθους αργίλου-λάσπης (<53μm).

Ωστόσο, πέρα από τις ήδη υπάρχουσες μετρήσεις μέχρι την εκκίνηση αυτής της μελέτης, έγιναν κάποιες επιπλέον. Συγκεκριμένα, μετρήθηκε το σωματιδιακό οργανικό υλικό (Particulate Organic Matter, POM), η ποσότητα δηλαδή του οργανικού υλικού που περιλαμβάνει το αποδομήσιμο φυτικό υλικό (Decomposable Plant Material, DPM) και το ανθεκτικό φυτικό υλικό (Resistant Plant Material, RPM) με σκοπό να μειωθεί η αβεβαιότητα στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Δηλαδή, αντί το POM, ως δεδομένο εισαγωγής για την αρχικοποίηση και βαθμονόμηση του μοντέλου, να είχε ένα εύρος τιμών είχε πλέον συγκεκριμένη τιμή για κάθε λιθολογία. Έγινε έτσι μέτρηση του POM σε δύο στρώματα εδάφους για κάθε δείγμα. Στο επιφανειακό έδαφος (Topsoil, 0-15cm) στο οποίο γίνονται οι περισσότερες αλλαγές στα συσσωματώματα και στο SOM, λόγω και του βάθους των ριζών των φυτών (Potter και Derner, 2006) και στο βαθύτερο στρώμα εδάφους (Subsoil, 15-30cm) έτσι ώστε να γίνει υπολογισμός των αλλαγών στην αποθήκευση του SOM και για τα βάθη στα οποία φτάνουν οι μεγαλύτερες ρίζες των φυτών στα καλλιεργήσιμα εδάφη (Stamati et al., 2012). Για τον ίδιο σκοπό, έγιναν και μετρήσεις Bouyoucos στα έξι δείγματα που μελετήθηκαν έτσι ώστε να έχουμε συγκεκριμένες τιμές και για την επί τις εκατό περιεκτικότητα των εδαφών σε άργιλο. Σημειώνεται ακόμη ότι τα βαθύτερα στρώματα εδάφους είχαν χρησιμοποιηθεί εξ αρχής για τον υπολογισμό της φαινόμενη πυκνότητας (bulk density) των εδαφών.

3.4 Μοντελοποίηση του κύκλου του άνθρακα με το RothC

3.4.1 Βαθμονόμηση

Με τη βοήθεια του RothC, έγινε προσομοίωση του οργανικού υλικού του εδάφους (SOC) όπου χρησιμοποιήθηκε μηνιαίο χρονικό βήμα για να γίνει η βαθμονόμησή του.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα για την περιεκτικότητα των εδαφών σε οργανικό υλικό από τους θαμνότοπους και από τα εδάφη που καλλιεργούνταν για 50 χρόνια μέχρι το έτος 2010. Η βαθμονόμηση έγινε για τις τρεις διαφορετικές λιθολογίες ξεχωριστά.

3.4.1.1 Δεδομένα εισαγωγής

Ως δεδομένο εισαγωγής για το πάχος του εδάφους, στο οποίο και έγιναν οι μετρήσεις, τέθηκαν τα 30cm. Για την εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων δεν υπάρχουν μετρήσεις και γι αυτό η κατάλληλη εμβέλεια τιμών για αυτή την ποσότητα υπάρχει στη βιβλιογραφία για συγκεκριμένο κλίμα και για συγκεκριμένη χρήση γης. Έτσι, έχει αναφερθεί μία μέση συνολική παραγωγή για τα υπολείμματα στους Μεσογειακούς θαμνότοπους με τιμές από 1.3-2.9 t ha^{-1}, ενώ στην επιστημονική βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί και υψηλότερες τιμές που κυμαίνονται από 4.0 έως 6.7 t ha^{-1} (Fioretto et al., 2003). Στην περίπτωσή μας θεωρήθηκε ότι κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου τα ακαλλιέργητα πεδία καλύπτονται με γρασίδι και θάμνους και τα καλλιεργήσιμα με ελιές και πορτοκαλιές και ότι γίνεται εισαγωγή φυτικού υλικού στο έδαφος επίσης κατά τη διάρκεια όλου του χρόνου η οποία κυμαίνεται από 3,5 έως 6 t C ha^{-1}. Μία αναλογία η οποία συσχετίζει τη μέση περιεκτικότητα του εδάφους σε άνθρακα με τα φυτικά υπολείμματα θεωρείται ότι είναι η 1/2 (λόγος περιεκτικότητα του εδάφους σε άνθρακα/ φυτικά υπολείμματα) και μία τυπική εμβέλεια τιμών για αυτή την περιεκτικότητα θεωρείται ότι είναι από 0.5 έως 4.5 t C ha^{-1} (Stamati et al., 2012). Όπως φαίνεται, οι μετρήσεις που έχουν γίνει για την εκτίμηση της τιμής της εισαγωγής φυτικών υπολειμμάτων είναι περιορισμένες λόγω και του κόστους αλλά και της δυσκολίας εκπόνησης των μετρήσεων με αποτέλεσμα αυτό το δεδομένο εισαγωγής να αποτελεί, όπως θα φανεί και αργότερα στα αποτελέσματα, σημαντικό παράγοντα για την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων. Η τιμή της περιεκτικότητας των εδαφών σε άργιλο (% clay content), δόθηκε από τις μετρήσεις Bouyoucos. Πηγή των μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο για τη βαθμονόμηση (μέσος όρος της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και ανοιχτής εξάτμισης) ήταν ο Τοπικός Κλιματολογικός Εκτιμητής του Σαμωνά. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Τα δεδομένα αυτά μεταβλήθηκαν όταν εξεταζόταν το σενάριο των κλιματικών αλλαγών όπως αυτές περιγράφονται από το IPCC-A1B σενάριο (το IPCC-A1B σενάριο θέτει ισορροπημένη έμφαση σε όλες τις πηγές ενέργειας). Το σενάριο κλιματικών αλλαγών εξετάστηκε για τις δυο περιπτώσεις, μετάβασης από θαμνότοπους σε καλλιεργήσιμα πεδία και παράτασης καλλιέργειας ήδη υποβαθμισμένων πεδίων λόγω καλλιέργειας για ήδη 50 χρόνια. Στο σενάριο κλιματικών αλλαγών η προσθήκη κοπριάς ή κάποιου άλλου εδαφοβελτιωτικού (FYM input) είναι μηδενική, ενώ στο σενάριο προσθήκης κοπριάς (49/49/2) και δύο διαφορετικών εδαφοβελτιωτικών (30/60/10, 10/70/20) η τιμή αυτή είναι για το καθένα 2,5 t/ha y.

Πίνακας 3.2 Μέση μηνιαία τιμή για τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση (μέσος όρος από το μεγάλο διάστημα 1960-2010) από το σταθμό Σαμωνά.

	Samonas (1960-2010)			Samonas (1990-2010)		
Mont	Tem	Rai	PET	Temp	Rai	PET
	(°C	(mm	(mm	(°C)	(mn	(mm
1	10.	224	44	10.4	20	45
2	10.	155	47	10.3	13	47
3	11.	132	70	12.3	10	71
4	14.	51	97	15.2	48	98
5	19.	19	147	19.5	17	151
6	23.	8	197	24.1	4	203
7	25.	1	223	26.3	1	232
8	25.	1	197	26.2	2	206
9	22.	24	138	23.1	23	142
10	19.	110	96	19.7	75	100
11	15.	135	62	15.4	13	63
12	11.	196	47	11.9	19	47
Annu	17.	105	1363	17.9	94	140

3.4.1.2 Αρχικές συνθήκες στο μοντέλο

Σε αυτό το μοντέλο ο οργανικός άνθρακας του εδάφους χωρίζεται σε τέσσερις ενεργές ενότητες κάθε μία από τις οποίες έχει το δικό της ρυθμό αποδόμησης και σε μία ενότητα αδρανούς οργανικού υλικού ανθεκτικού στην αποδόμηση (inert organic matter, IOM). Οι τέσσερις ενεργές ενότητες είναι το αποδομήσιμο φυτικό υλικό (Decomposable Plant Material, DPM), το μόνιμο φυτικό υλικό (Resistant Plant Material, RPM), η μικροβιακή βιομάζα (Microbial Biomass, BIO) και το χουμοποιημένο οργανικό υλικό (Humified Organic Matter, HUM). Οι ενότητες αυτές μαζί με τον ολικό άνθρακα (Total C) ο οποίος μετρήθηκε στους θαμνότοπους αποτελούν τις αρχικές συνθήκες του μοντέλου που εισάγονται για τη βαθμονόμησή του. Ουσιαστικά τα βασικά δεδομένα που μετρήθηκαν στο πεδίο για να συμπληρωθούν οι τιμές των παραπάνω ενοτήτων είναι η περιεκτικότητα των εδαφών σε SOC και POM. Εδώ πρέπει να πούμε ότι ο άνθρακας του POM που έχει συσχετισθεί με την ποσότητα του RPM στο RothC είναι ο άνθρακας με μέγεθος σωματιδίων >50 μm (Galdo et al., 2003, Gottschalk et al., 2010). Βάσει, λοιπόν των μετρήσεων και χρησιμοποιώντας την ακόλουθη προσέγγιση συμπληρώθηκαν οι τιμές των δεξαμενών του άνθρακα: Η περιεκτικότητα του εδάφους σε POM είναι το άθροισμα των RPM και DPM κλασμάτων, η κατανομή στα οποία γίνεται με τη βαθμονόμηση (εξ αρχής ως μικρότερη πάντα ποσότητα στο έδαφος το DPM από το RPM, τέθηκε ίσο με 0,681). Βάσει της πρότασης στο μοντέλο RothC-26.3, το BIO θεωρείται ότι είναι το 3% του συνολικού SOC και το IOM ισούται με 0.049 $C^{1.139}$ όπως προτείνεται από τους Fallon et al. (1998). Για αυτούς τους υπολογισμούς, δηλαδή του BIO και του IOM, χρησιμοποιήθηκε η περιεκτικότητα σε SOC των θαμνότοπων. Ειδικά για το IOM θεωρείται ότι ο αδρανής άνθρακας δεν αλλάζει σημαντικά εξαιτίας της καλλιέργειας για λίγες δεκαετίες. Παρόλα αυτά, επειδή υπάρχει αβεβαιότητα σε αυτή την υπόθεση, στην ανάλυση αβεβαιότητας η εμβέλεια της ποσότητας του IOM είναι από το μηδέν έως την τιμή που προκύπτει από την ισότητα του Fallon. Τέλος, η δεξαμενή του HUM υπολογίστηκε από τη διαφορά των υπόλοιπων δεξαμενών από τη συνολική ποσότητα του SOC.

3.4.1.3 Παράμετροι του μοντέλου

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι τέσσερις δεξαμενές του άνθρακα αποδομούνται με μίας πρώτης τάξεως διαδικασία με έναν χαρακτηριστικό ρυθμό αποδόμησης (decomposition rate) για κάθε μία από αυτές. Οι προεπιλεγμένες σταθερές του μοντέλου για το ρυθμό αποδόμησης (decomposition rate constant) (k, $years^{-1}$) για κάθε κατηγορία, βάσει της βιβλιογραφίας είναι: DPM: 10.0, RPM: 0.3, BIO:0.66, HUM: 0.02, ενώ για το IOM:0. Για την κατανομή των εισαγόμενων φυτικών υπολειμμάτων στα DPM και RPM χρησιμοποιούνται οι παράγοντες που αναφέρονται από τους Coleman και Jenkinson (1999), δηλαδή ο λόγος $\frac{\mathbf{DPM}}{\mathbf{RPM}}$ ίσος με τον αριθμό 1.44 για τους λειμώνες και ίσος με τον αριθμό 0.67 για τους θαμνότοπους. Η προεπιλεγμένη επί τις εκατό τιμή για την περιεκτικότητα του εδάφους σε μικροβιακή βιομάζα είναι 46%. Υπό κανονικές συνθήκες οι τιμές αυτές των παραμέτρων του μοντέλου δε μεταβάλλονται. Στην περίπτωσή μας όμως, κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης, χρησιμοποιήθηκαν για τις παραμέτρους αυτές το εύρος ±10% της προεπιλεγμένης τιμής του DPM, της BIO, του λόγου $\frac{\mathbf{DPM}}{\mathbf{RPM}}$ και της BIO%. Ακόμη, το RPM έπαιρνε εύρος τιμών από 0,1 έως 0,25 και το HUM εύρος τιμών από 0,02 έως 0,1.

3.4.1.4 Βαθμονόμηση

Οι παραπάνω τιμές και εύρη τιμών σε μία έκδοση Microsoft Excel του Rothamsted Carbon Model (RothC) και σε συνδυασμό με το @RISK (PALISADES Corp.) χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση Monte Carlo προσομοιώσεων ώστε να γίνει βαθμονόμηση των τιμών του έτους 2050. Η εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων και οι έξι παράμετροι του μοντέλου πήραν ταυτόχρονα τιμές με ομοιόμορφη κατανομή και έδωσαν 5.000 συνδυασμούς για κάθε λιθολογία. Με έλεγχο αξιολογήθηκε αν τα εύρη τιμών που τέθηκαν ήταν κατάλληλα, διαφορετικά μεταβάλλονταν. Ειδικότερα, υπολογίστηκαν η τυπική απόκλιση για τις επιλεγμένες λύσεις της φυτικής εισαγωγής και των έξι παραμέτρων του μοντέλου και οι τιμές τους συγκρίθηκαν με τις αρχικές κατανομές. Χαμηλή τυπική απόκλιση υποδείκνυε τη μοναδικότητα της βέλτιστης λύσης, εφόσον και το ίδιο το σύστημα είναι εξ αρχής περιορισμένο και δε γίνονται σε αυτό συνδυασμοί των ακραίων τιμών των παραμέτρων προς σχηματισμό αποδεκτών λύσεων. Οι συνδυασμοί που περιλαμβάνουν το ±5% των τιμών του πεδίου για το SOC και το POM έπρεπε να είναι αρκετοί, δηλαδή πάνω από 60. Ως βέλτιστη λύση θεωρήθηκε εκείνη η λύση με τη χαμηλότερη απόκλιση (<±1%) από τις μετρήσεις πεδίου και των δύο, του SOC και του POM και ως τιμές βαθμονόμησης θεωρήθηκαν οι τιμές των παραμέτρων που αποτέλεσαν τη λύση. Ακόμη, στους συνδυασμούς που βρίσκονταν στο ±5% των τιμών του πεδίου για το SOC και το POM, έγινε προσαρμογή των κατανομών (Distribution Fitting) για τις 6 παραμέτρους του μοντέλου και την εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων.

3.4.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Οι βαθμονομημένες τιμές που προέκυψαν από τη διαδικασία της βαθμονόμησης εισήχθησαν στο μοντέλο και έγινε ανάλυση ευαισθησίας (Advanced Sensitivity Analysis) για το έτος 2050 πρώτα του SOC και ύστερα του POM λόγω της ±50% αλλαγής των βαθμονομημένων τιμών των παραμέτρων του μοντέλου και της εισαγωγής φυτικών υπολειμμάτων και λόγω της ±10% αλλαγής αυτών. Οι επαναλήψεις αυτή τη φορά ήταν 1000 για κάθε μία από τις παραμέτρους του μοντέλου και για την εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων.

3.4.3 Ανάλυση αβεβαιότητας

Για να γίνει η ανάλυση αβεβαιότητας χρησιμοποιήθηκε η κατανομή για κάθε παράμετρο που προέρχεται από τη διαδικασία προσαρμογής των κατανομών (Distribution Fitting) που έγινε σε προηγούμενο στάδιο για εκείνες τις επαναλήψεις που βρίσκονται μεταξύ του ±5% του SOC και του POM που μετρήθηκαν στο πεδίο. Έγινε ανάλυση αβεβαιότητας για το 2050 στα προσομοιωμένα αποτελέσματα, εξαιτίας των αρχικών συνθηκών (δεξαμενές άνθρακα SOC, DPM, RPM, BIO, HUM, και IOM), της περιεκτικότητας του εδάφους σε άργιλο, της εισαγωγής φυτικών υπολειμμάτων και των έξι παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση, για κάθε κατηγορία χωριστά και για όλες μαζί συνολικά. Η διαφοροποίηση του εδάφους όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες και την περιεκτικότητά του σε άργιλο δε μπορεί να εκτιμηθεί εφόσον τα δείγματα ήταν ένας συνδυασμός πέντε μικρότερων δειγμάτων. Για να ξεπεραστεί αυτό το ζήτημα, επιλέχθηκε η κανονική κατανομή με μέση τιμή την βαθμονομημένη τιμή και τυπική απόκλιση το 5% της μέσης τιμής. Η αβεβαιότητα της δεξαμενής του IOM θεωρήθηκε ότι είναι μία ομοιόμορφη κατανομή που κυμαίνεται από το μηδέν έως την τιμή που προκύπτει από την εξίσωση του Falloon (Stamati et al., 2012).

3.4.4 Σενάριο κλιματικών αλλαγών

Για τις εικοσαετίες 2010-2030 και 2030-2050, υπό τη θεώρηση ότι σε πρώτη περίπτωση θα έχουμε μετατροπή των εδαφών από θαμνότοπους σε καλλιεργήσιμα εδάφη και ότι σε δεύτερη περίπτωση θα έχουμε παράταση της καλλιέργειας των ήδη καλλιεργούμενων για 50 χρόνια εδαφών και παράλληλα με τη θεώρηση ότι θα υπάρχουν κλιματικές αλλαγές έγινε εκτίμηση του αποθέματος των εδαφών σε SOC. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που μεταβλήθηκαν όταν εξεταζόταν το σενάριο των κλιματικών αλλαγών, όπως αυτές περιγράφονται από το IPCC-A1B σενάριο (το IPCC-A1B σενάριο θέτει ισορροπημένη έμφαση σε όλες τις πηγές ενέργειας), φαίνονται στον Πίνακα 3.3. Για τα σενάρια των κλιματικών αλλαγών επιλέχθηκε ο συνδυασμός των Μοντέλων Γενικής Κυκλοφορίας (General Circulation Models, GCM) [ECHAM5 (Roeckner, 2003); BCA (Déqué et al., 1994)] και των τριών Μοντέλων Τοπικής Κυκλοφορίας (Regional Circulation Models, RCM) [RACMO2 (van Meijgaard et al., 2008); RCA (Kjellstrom et al., 2005); REMO (Jacob, 2001)]. Βασίζονται στο σενάριο A1B. Η οικογένεια σεναρίων A1, στην οποία ανήκει η A1B, βασίζεται στη γρήγορη οικονομική ανάπτυξη, στην αύξηση του πληθυσμού μέχρι τα μέσα του αιώνα και στη συνέχεια στη μείωση αυτού και στην προοπτική μελλοντικής χρήσης νέων και πιο αποδοτικών τεχνολογιών. Το σενάριο A1B εισάγει μία ισορροπημένη έμφαση στις πηγές ενέργειας (IPCC, 2000). Οι τρεις συνδυασμοί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν BCA-RCA, ECHAM-RACMO και ECHAM-REMO και κάλυπταν τη χρονική περίοδο από το 1990 έως το 2050. Ωστόσο, όλες οι σειρές των κλιματικών αλλαγών διορθώθηκαν για κάθε τοπικό σταθμό, όπως σημειώνεται από τους Rojas et al. (2011).Από τα σενάρια BCA-RCA, ECHAM-RACMO και ECHAM-REMO, τα δύο τελευταία παρουσιάζουν μεγαλύτερες αυξήσεις στη θερμοκρασία.

Πίνακας 3.3 Τα σενάρια κλιματικών αλλαγών για το σταθμό Σαμωνά.

Month	BCA-RCA (2010-2030)			ECHAM-RACMO (2010-2030)			ECHAM- REMO (2010-2030)		
	Temp (°C)	Rain (mm)	PET (mm)	Temp (°C)	Rain (mm)	PET (mm)	Temp (°C)	Rain (mm)	PET (mm)
1	10.6	179	46	10.5	197	45	10.6	220	45
2	10.6	148	48	10.4	141	47	10.0	143	46
3	12.6	112	73	12.0	103	70	11.7	115	69
4	15.5	30	100	15.5	49	100	15.2	51	98
5	19.9	17	154	19.6	18	152	19.3	14	149
6	24.8	6	213	24.5	4	209	24.4	4	207
7	26.6	10	236	26.4	1	233	26.5	1	234
8	27.4	39	221	26.3	2	207	26.5	3	209
9	23.4	1	145	24.2	25	152	24.2	21	151
10	20.2	81	103	19.9	123	101	20.1	105	103
11	15.4	133	62	15.3	156	62	15.3	150	62
12	12.2	188	48	12.4	210	48	12.2	202	48
Annual	18.3	943	1448	18.1	1029	1427	18.0	1030	1421
Month	**BCA-RCA (2030-2050)**			**ECHAM-RACMO (2030-2050)**			**ECHAM REMO (2030-2050)**		
	Temp (°C)	**Rain (mm)**	**PET (mm)**	**Temp (°C)**	**Rain (mm)**	**PET (mm)**	**Temp (°C)**	**Rain (mm)**	**PET (mm)**
1	10.9	188	46	12.1	169	50	12.1	204	50
2	10.5	133	48	11.9	115	52	11.6	111	51
3	13.0	82	74	14.0	97	79	13.4	99	76
4	16.3	38	105	16.6	39	107	16.2	34	105
5	21.7	14	171	21.2	8	167	21.2	12	166
6	26.5	8	235	25.9	4	225	25.7	4	224
7	28.3	-45	262	28.0	0	255	28.1	1	256
8	28.6	-1	236	28.0	2	227	27.8	2	225
9	24.0	-11	150	24.6	24	155	24.5	22	153
10	21.5	52	111	21.9	33	114	21.8	77	113
11	16.1	129	65	17.2	125	69	17.1	146	69
12	13.3	192	51	13.4	181	52	13.5	171	52
Annual	19.2	778	1554	19.6	797	1551	19.4	881	1541

3.4.5 Σενάριο προσθήκης εδαφοβελτιωτικών παράλληλα με κλιματικές αλλαγές

Στο σενάριο αυτό εξετάζεται η αλλαγή της οργανικής ύλης στο έδαφος λόγω της προσθήκης κοπριάς (49/49/2) και εδαφοβελτιωτικών (30/60/10, 10/70/20), παράλληλα με τις κλιματικές αλλαγές και τα ήδη υποβαθμισμένα εδάφη ή αυτά που μεταβαίνουν από μη καλλιεργήσιμα σε καλλιεργήσιμα. Εδώ η εισαγωγή κοπριάς ή εδαφοβελτιωτικού (FYM input) παίρνει την τιμή 2,5 t/ha y για το καθένα, ενώ οι αριθμοί που τα χαρακτηρίζουν αναφέρονται στα DPM, RPM και HUM με τη σειρά που αναγράφονται.

4. Αποτελέσματα

4.1 Τιμές των παραμέτρων των δειγμάτων

Τα δείγματα που μελετήθηκαν, οι λιθολογίες στις οποίες ανήκουν και οι ήδη υπάρχουσες μετρήσεις των παραμέτρων τους αλλά και οι επιπλέον μετρήσεις που έγιναν φαίνονται στον Πίνακα 4.1 (με έντονα γράμματα οι επιπλέον μετρήσεις).

Πίνακας 4.1 Παράμετροι του εδάφους για τους θαμνότοπους και τα πεδία με καλλιέργειες ελιών κάτω υπό διαφορετικές λιθολογίες για την κρίσιμη ζώνη (CZO) της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση με το RothC.

Geologic formation		Schists		Marls		Trypalis	
Land cover		Cropland	Shrubland	Cropland	Shrubland	Cropland	Shrubland
Sample ID		25G	16A	6B	9B	10G	4A
Altitude		290	219	383	383	375	308
BD	g/cm3	1.20	1.19	1.08	1.09	1.19	1.10
pH	-	6.53	5.99	7.86	7.68	7.59	7.67
COND	μS/cm	24.5	23.0	106.0	96.5	79.5	86.5
TOC (0-15 cm)	%	1.47	1.63	2.77	3.78	2.62	3.03
POM-C/TOC (0-15 cm)	%	32.07	37.11	56.98	43.44	43.71	52.25
TOC (15-30 cm)	%	1.67	0.67	1.72	3.10	1.62	2.67
POM-C/TOC (15-30 cm)	%	29.92	12.17	8.19	13.54	9.13	7.54
TKN, 0-15	%	0.13	0.10	0.31	0.34	0.36	0.29
TOC (0-30 cm)	t/ha	**56.7**	**40.1**	**72.8**	**112.8**	**76.5**	**101.1**
POM (0-30 cm)	t/ha	**17.5**	**12.2**	**27.9**	**33.8**	**23.0**	**29.5**
POM-C/TOC (0-30 cm)	%	**30.9**	**30.2**	**38.3**	**30.0**	**30.2**	**29.7**
Clay (<2 μm)	%	**13.1**	**17.7**	**16.5**	**12.4**	**28.8**	**32.7**
Silt -Clay (<53 μm)	%	39.8	40.8	51.6	43.1	76.9	73.5
Coarse sand (>1000 μm)	%	24.3	32.0	25.1	27.9	1.4	3.1
WSA (> 250 μm)	%	28.6	34.8	44.2	47.6	69.7	77.7
WSA (> 1000 μm)	%	18.1	25.4	32.8	32.0	47.8	60.9
MWD	mm	1.6	2.1	2.5	2.3	2.5	3.0
C/N	-	11.3	15.9	8.9	11.0	7.3	10.4
K-BaCl2	cmoL/kg	0.28	0.21	0.16	0.11	0.59	0.91
Ca-BaCl2	cmoL/kg	1.62	1.95	6.83	8.48	7.26	7.62
eCEC	cmoL/kg	17.92	21.37	13.02	13.54	8.38	10.02
BS	%	10.83	10.05	54.66	64.18	97.66	87.98
Al-ox	%	0.13	0.21	0.36	0.53	0.27	0.83
Fe-ox	%	0.37	0.23	0.31	0.43	0.31	0.51
Fe-ox/F-d	-	0.52	0.26	0.55	0.69	0.74	0.71
N-1hour	mg N/kg	9.4	3.5	9.7	7.4	8.2	8.9
PMN	mg N/kg	51.9	41.2	143.0	120.0	83.9	80.1
CaCO3	%	3.6	3.8	11.5	10.1	4.9	1.7

4.2 Βαθμονόμηση

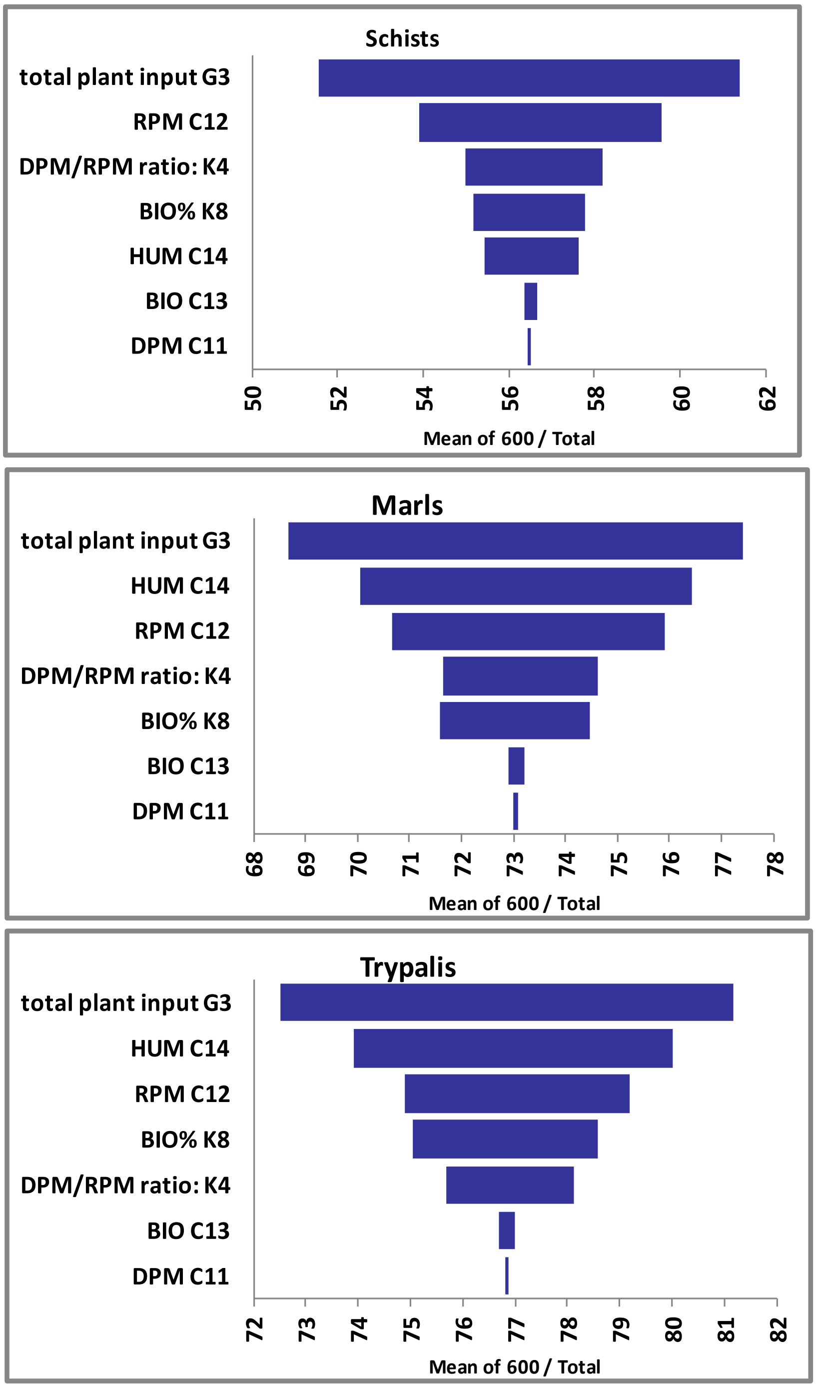
Οι προσομοιώσεις που έγιναν για τις τρεις λιθολογίες και περιλαμβάνουν το ±5% των τιμών του πεδίου για το SOC και το POM έδωσαν τα στατιστικά που φαίνονται στον Πίνακα 4.2 (distribution type, min, max, mean, std, Chi-sq). Όσον αφορά τα δεδομένα εισαγωγής, το εύρος της εισαγωγής φυτικού υλικού στο έδαφος (plant litter input) και για τις τρεις λιθολογίες βρέθηκε τελικά ότι κυμαίνεται από 4,68 έως 5,25 t C ha^{-1}. Από την άλλη μεριά, όσον αφορά τις παραμέτρους του μοντέλου, για τις σταθερές του ρυθμού αποδόμησης το εύρος τελικά ήταν από 0,11 έως 0,13 y^{-1} για το RPM και από 0,0351 έως 0,0495 y^{-1} για το HUM. Πιο συγκεκριμένα, για τις τρεις λιθολογίες οι βέλτιστες τιμές που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση για τις έξι παραμέτρους του μοντέλου και την ολική εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων δίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Στατιστικά για την παράμετρο της κατανομής για τις λύσεις που βρίσκονταν στο ±5% του αποθέματος του SOC και του POC που μετρήθηκε καθώς επίσης και η βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν από την Monte-Carlo προσομοίωση για τις τρεις μετατροπές θαμνότοπων σε καλλιέργειες που προσομοιώθηκαν στην κρίσιμη ζώνη (CZO) της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Parameter	total plant input	DPM/RPM ratio	BIO%	DPM	RPM	BIO	HUM
Schists							
distribution type	BetaGeneral	BetaGeneral	Uniform	Uniform	Triang	BetaGeneral	Triang
min	4.41	1.30	41.41	8.99	0.10	0.59	0.0155
max	5.99	1.58	50.63	10.97	0.14	0.73	0.0655
mean	5.37	1.43	46.04	9.98	0.11	0.66	0.0435
std	0.39	0.09	2.67	0.57	0.01	0.04	0.0104
Chi-sq	9.49	10.32	7.82	12.62	12.20	2.39	9.4870
Optimum	5.25	1.34	44.84	10.25	0.11	0.62	0.0427
Marls							
distribution type	Uniform	Uniform	Uniform	Triang	BetaGeneral	BetaGeneral	BetaGeneral
min	4.00	1.29	41.57	8.69	0.10	0.60	0.0409
max	6.04	1.57	50.60	10.97	0.16	0.72	0.0603
mean	5.02	1.43	46.09	10.21	0.12	0.65	0.0521
std	0.59	0.08	2.61	0.54	0.01	0.04	0.0055
Chi-sq	9.09	2.55	2.18	5.45	3.64	4.00	4.0000
Optimum	5.03	1.40	46.28	9.99	0.12	0.68	0.0495
Trypalis							
distribution type	BetaGeneral	BetaGeneral	Uniform	Uniform	Triang	Uniform	Triang
min	3.60	1.30	41.28	9.02	0.09	0.60	0.0248
max	5.97	1.58	50.68	11.02	0.18	0.73	0.0487
mean	4.97	1.43	45.98	10.02	0.14	0.66	0.0377
std	0.76	0.09	2.71	0.58	0.02	0.04	0.0049
Chi-sq	8.86	5.71	9.43	2.86	7.14	5.71	6.2857
Optimum	4.68	1.47	46.19	9.98	0.13	0.67	0.0351

4.3 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας για την ±10% και ±50% μεταβολή των βαθμονομημένων τιμών των έξι παραμέτρων του μοντέλου και της εισαγωγής φυτικού υλικού, έδωσε τα παρακάτω γραφήματα ανεμοστρόβιλου (tornado graphs) στο Σχήμα 4.1 Ακόμη, υπολογίστηκε ο συντελεστής ευαισθησίας, η απόλυτη τιμή δηλαδή του λόγου $\frac{\frac{\Delta Y}{Y}}{\frac{\Delta X}{X}}$, για ±10% και ±50% μεταβολή των βαθμονομημένων τιμών. Οι τιμές των συντελεστών ευαισθησίας φαίνονται στον Πίνακα 4.3.



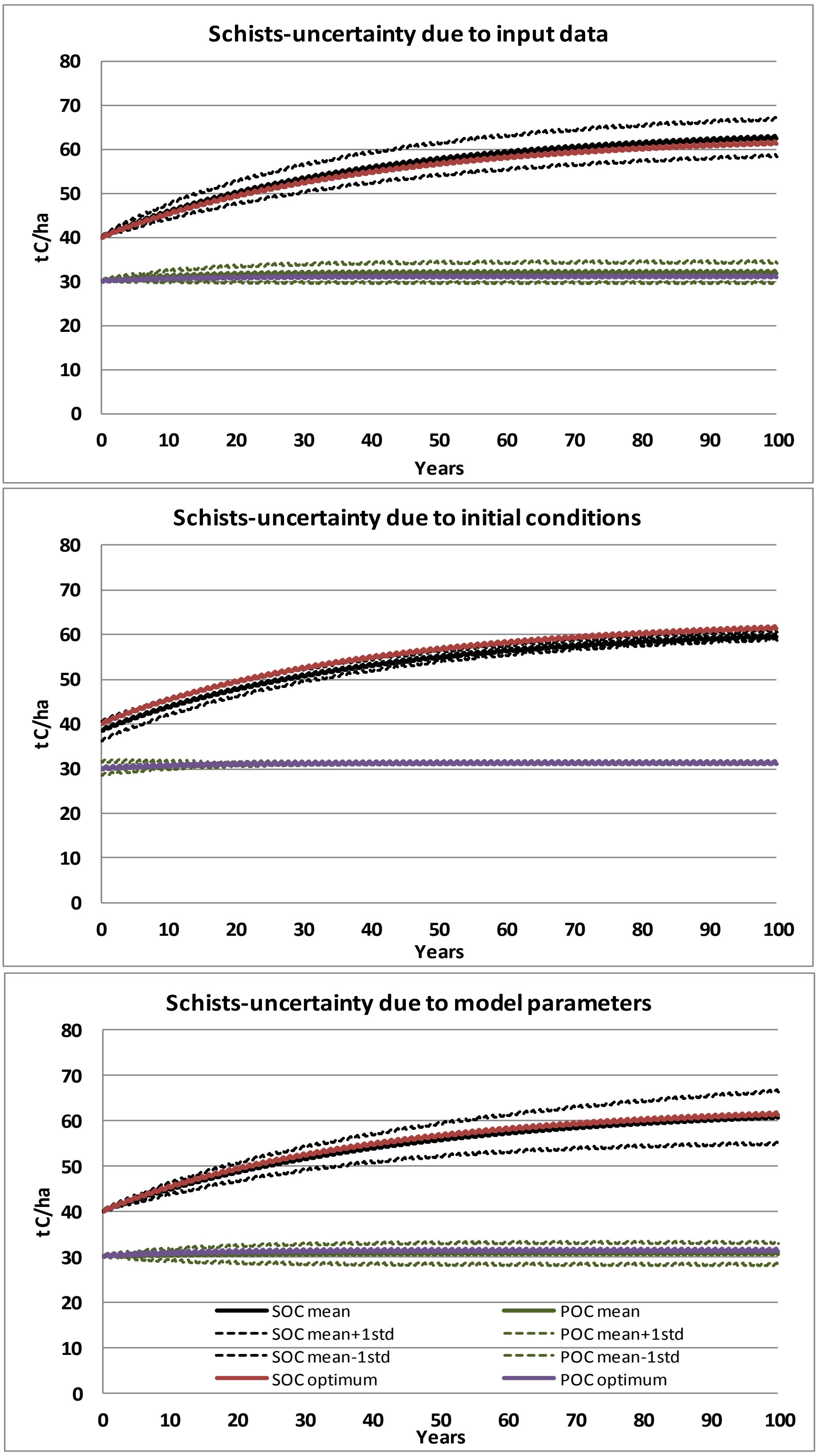
Σχήμα 4.1 Γραφήματα ανεμοστρόβιλου για 10%(αριστερά) και 50% (δεξιά) ανάλυση ευαισθησίας για τις τρεις μετατροπές θαμνότοπων σε καλλιέργειες που προσομοιώθηκαν στην κρίσιμη ζώνη (CZO) της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη.

Πίνακας 4.3 Συντελεστής ευαισθησίας (η απόλυτη τιμή του λόγου $\frac{\Delta Y / Y}{\Delta X / X}$) για τις παραμέτρους του μοντέλου RothC για ±10% και ±50% αλλαγή των βαθμονομημένων τιμών για τις τρεις μετατροπές θαμνότοπων σε καλλιέργειες (για τα 50 χρόνια μετατροπής που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση σε όλες τις τοποθεσίες) για τον οργανικό άνθρακα του εδάφους (SOC) και το σωματιδιακό άνθρακα (POC).

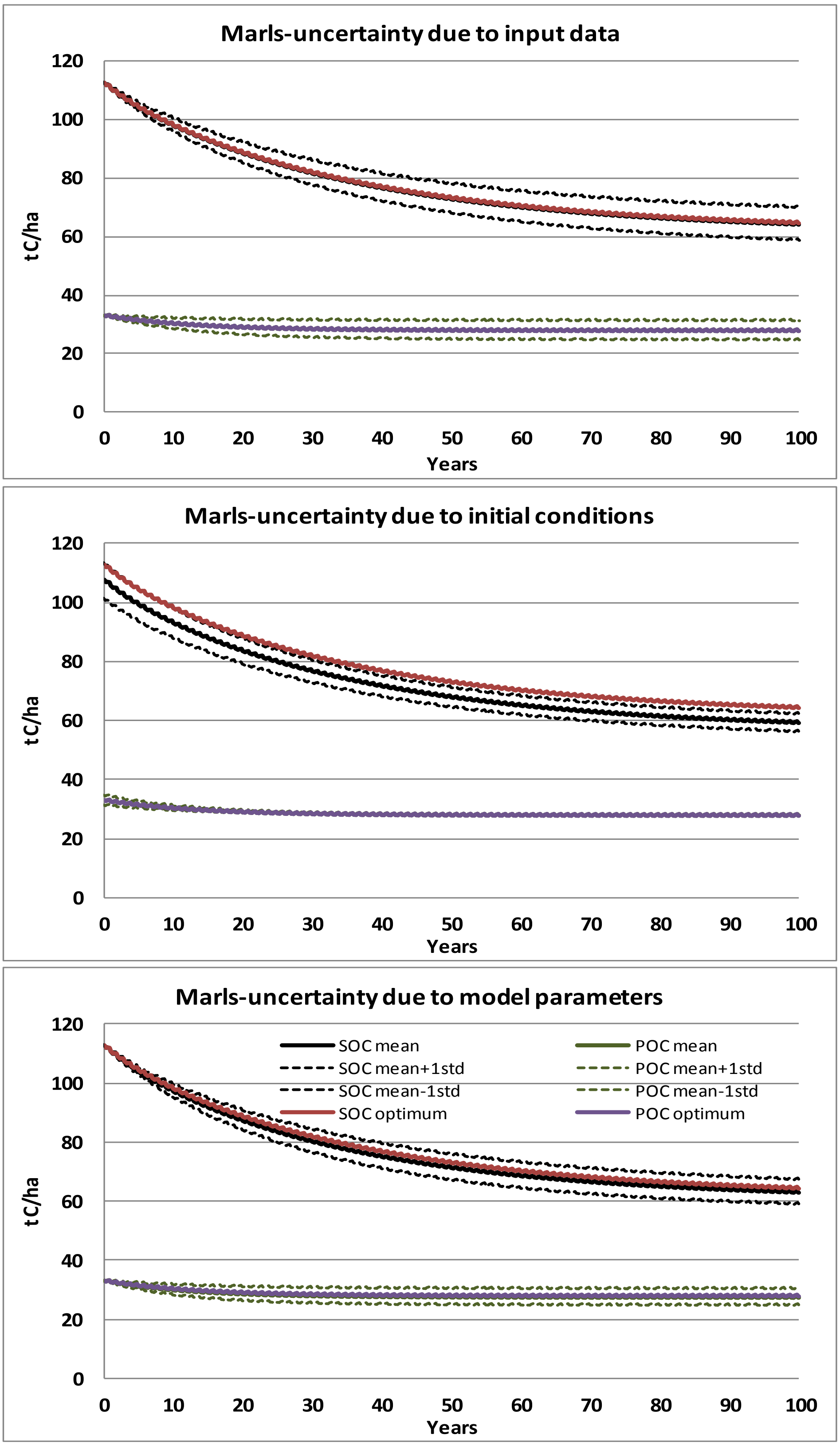
	Schists							
	SOC				**POC**			
	(-10%)	**(+10%)**	**(-50%)**	**(+50%)**	**(-10%)**	**(+10%)**	**(-50%)**	**(+50%)**
total plant input	0.871	0.871	0.871	0.871	0.976	0.976	0.976	0.976
DPM/RPM ratio	0.300	0.267	0.396	0.220	0.576	0.514	0.761	0.422
BIO%	0.231	0.234	0.227	0.239	0.000	0.000	0.000	0.000
DPM	0.008	0.006	0.015	0.004	0.014	0.011	0.027	0.007
RPM	0.545	0.457	0.847	0.341	1.049	0.876	1.644	0.652
BIO	0.028	0.023	0.050	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000
HUM	0.202	0.187	0.240	0.161	0.000	0.000	0.000	0.000
	Marls							
	SOC				**POC**			
	(-10%)	**(+10%)**	**(-50%)**	**(+50%)**	**(-10%)**	**(+10%)**	**(-50%)**	**(+50%)**
total plant input	0.597	0.597	0.597	0.597	0.975	0.975	0.975	0.975
DPM/RPM ratio	0.214	0.190	0.285	0.156	0.586	0.521	0.780	0.427
BIO%	0.196	0.198	0.193	0.202	0.000	0.000	0.000	0.000
DPM	0.006	0.005	0.012	0.003	0.016	0.012	0.031	0.008
RPM	0.392	0.326	0.621	0.242	1.071	0.889	1.714	0.657
BIO	0.022	0.018	0.039	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000
HUM	0.462	0.409	0.602	0.327	0.000	0.000	0.000	0.000
RPM initial								
	Trypalis							
	SOC				**POC**			
	(-10%)	**(+10%)**	**(-50%)**	**(+50%)**	**(-10%)**	**(+10%)**	**(-50%)**	**(+50%)**
total plant input	0.563	0.563	0.563	0.563	0.981	0.981	0.981	0.981
DPM/RPM ratio	0.170	0.150	0.227	0.123	0.600	0.532	0.803	0.434
BIO%	0.229	0.232	0.223	0.238	0.000	0.000	0.000	0.000
DPM	0.005	0.004	0.010	0.003	0.019	0.015	0.036	0.010
RPM	0.306	0.253	0.496	0.187	1.079	0.890	1.767	0.655
BIO	0.021	0.017	0.038	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000
HUM	0.415	0.380	0.500	0.321	0.000	0.000	0.000	0.000

4.4 Ανάλυση αβεβαιότητας

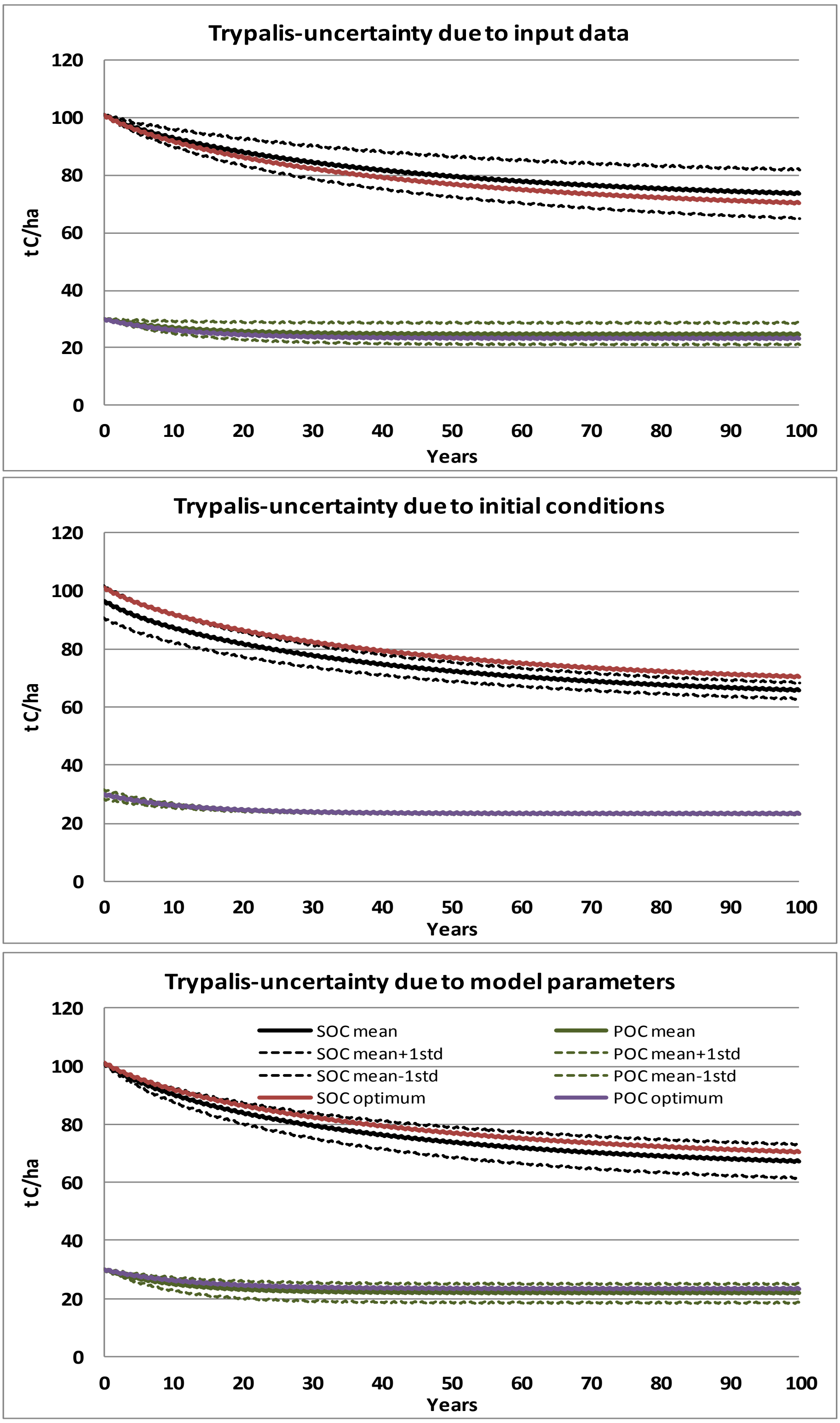
Με τη διαδικασίας της ανάλυσης αβεβαιότητας έγινε σύγκριση της βέλτιστης τιμής που προέκυψε από την προσομοίωση του SOC και του POM και της μέσης τιμής που προέκυψε από τις τιμές των συνδυασμών που ανήκαν στο ±5% των τιμών του πεδίου για το SOC και το POM. Οι αβεβαιότητες αυτές οι οποίες φαίνονται και στο Σχήμα 4.2.α, 4.2.β, 4.2.γ και 4.2.δ είναι γνωστό εξ αρχής ότι θα υπάρχουν και οφείλονται στις αρχικές συνθήκες του μοντέλου (δεξαμενές SOC, DPM, RPM, BIO, HUM και IOM), στα δεδομένα εισαγωγής (εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων και περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο) και στις έξι παραμέτρους του μοντέλου (ρυθμοί αποδόμησης του DPM, RPM, BIO και HUM, λόγος $\frac{DPM}{RPM}$ και BIO%). Η αβεβαιότητα λόγω των δεδομένων εισαγωγής, των αρχικών συνθηκών και των παραμέτρων των μοντέλων για τους σχιστόλιθους φαίνεται στο Σχήμα 4.2.α, για τις μάργες στο Σχήμα 4.2.β και για τους ασβεστόλιθους στο Σχήμα 4.2.γ, ενώ στο Σχήμα 4.2.δ φαίνεται η συνολική αβεβαιότητα λόγω όλων των παραπάνω παραμέτρων. Συνολικά, η αβεβαιότητα που προκύπτει από τη συνεισφορά όλων των παραπάνω παραμέτρων, ύστερα από 100 χρόνια καλλιέργειας ήταν 40,3% για το Σχιστόλιθο, 32,7% για τις Μάργες και για τους ασβεστόλιθους 72,8% της αρχικής μεταβολής του C λόγω της αλλαγής χρήσης γης (1990-2010).



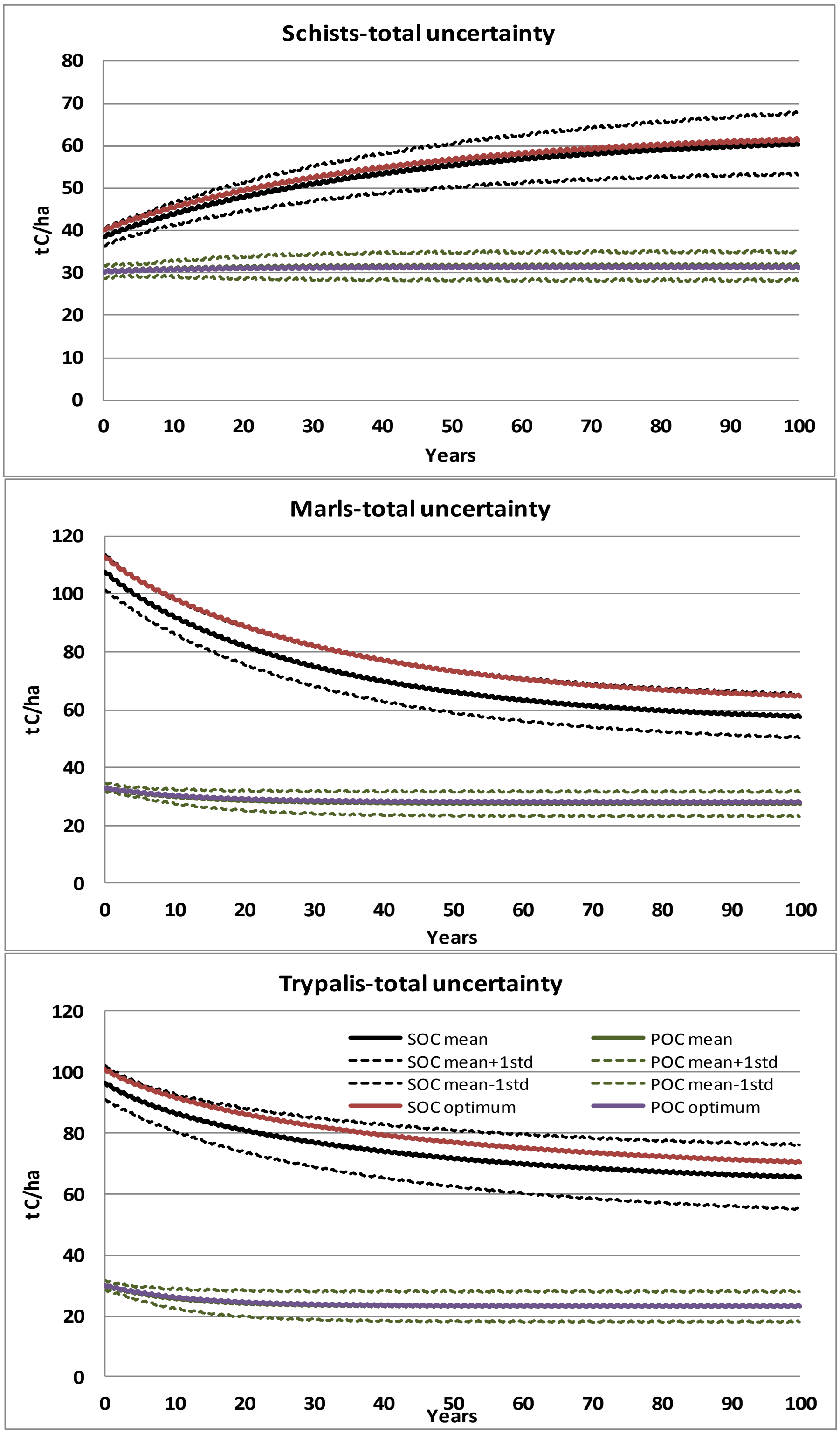
Σχήμα 4.2.α Αβεβαιότητα του συνολικού οργανικού άνθρακα (SOC) και του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (POC) εξαιτίας των παραμέτρων του μοντέλου, των δεδομένων εισαγωγής και των αρχικών συνθηκών του μοντέλου συγκρινόμενα με τη βέλτιστη λύση (από τη βαθμονόμηση) για τις δύο τοποθεσίες των σχιστόλιθων.



Σχήμα 4.2.β Αβεβαιότητα του συνολικού οργανικού άνθρακα (SOC) και του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (POC) εξαιτίας των παραμέτρων του μοντέλου, των δεδομένων εισαγωγής και των αρχικών συνθηκών του μοντέλου συγκρινόμενα με τη βέλτιστη λύση (από τη βαθμονόμηση) για τις δύο τοποθεσίες των μαργών.



Σχήμα 4.2.γ Αβεβαιότητα του συνολικού οργανικού άνθρακα (SOC) και του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (POC) εξαιτίας των παραμέτρων του μοντέλου, των δεδομένων εισαγωγής και των αρχικών συνθηκών του μοντέλου συγκρινόμενα με τη βέλτιστη λύση (από τη βαθμονόμηση) για τις δύο τοποθεσίες του τρυπαλίου.



Σχήμα 4.2.δ Συνολική αβεβαιότητα του συνολικού οργανικού άνθρακα (SOC) και του σωματιδιακού οργανικού άνθρακα (POC) εξαιτίας των παραμέτρων του μοντέλου, των δεδομένων εισαγωγής και των αρχικών συνθηκών του μοντέλου συγκρινόμενα με τη βέλτιστη λύση (από τη βαθμονόμηση) για τις έξι τοποθεσίες.

4.5 Αποτελέσματα της καλλιέργειας στην ποσότητα SOC

Βάσει των αποτελεσμάτων φαίνεται ότι λόγω καλλιέργειας, το διάστημα 1990-2010 το SOC θα αυξηθεί κατά 11,2 t/ha στους σχιστόλιθους, ενώ θα μειωθεί κατά 20,58 t/ha και 12,32 t/ha στις μάργες και τους ασβεστόλιθους αντίστοιχα, δηλαδή ως ποσοστά του αρχικού SOC 27,94%, 18,24% και 12,18% αντίστοιχα. Από την άλλη μεριά, στη δεύτερη περίπτωση όπου το έτος 1990 θεωρείται ότι το έδαφος καλλιεργούταν ήδη για 50 χρόνια, παρατηρείται ότι το διάστημα 1990-2010 το SOC πάλι θα αυξηθεί στους σχιστόλιθους, ενώ θα μειωθεί στις μάργες και τους ασβεστόλιθους κατά 5 t/ha, 2,25 t/ha και 1,30 t/ha αντίστοιχα, δηλαδή εκφρασμένα σε ποσοστά της αρχικής ποσότητας SOC 8,85%, 3,09% και 1,69% αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 4.4 και 4.5

Πίνακας 4.4 Μεταβολή του SOC στη μετάβαση από θαμνότοπους σε εδάφη που καλλιεργούνται σε διάστημα 20 χρόνων (1990-2010).

	Schists	**Marls**	**Trypalis**
Initial SOC, t/ha	40.08	112.80	101.10
SOC change-20 years cultivation, t/ha	11.20	-20.58	-12.32
SOC change-20 years cultivation, % of initial SOC	27.94	-18.24	-12.18

Πίνακας 4.5 Μεταβολή του SOC λόγω καλλιέργειας για 20 χρόνια τα οποία ήδη καλλιεργούνταν για 50 χρόνια.

	Schists	**Marls**	**Trypalis**
Initial SOC, t/ha	56.49	73.05	76.84
SOC change-20 years cultivation, t/ha	5.00	-2.25	-1.30
SOC change-20 years cultivation, % of initial SOC	8.85	-3.09	-1.69

4.6 Σενάριο κλιματικών αλλαγών

Για τις εικοσαετίες 2010-2030 και 2030-2050, υπό τη θεώρηση ότι σε πρώτη περίπτωση θα έχουμε μετατροπή των εδαφών από θαμνότοπους σε καλλιεργήσιμα εδάφη και ότι σε δεύτερη περίπτωση θα έχουμε παράταση της καλλιέργειας των ήδη καλλιεργούμενων για 50 χρόνια εδαφών και παράλληλα με τη θεώρηση ότι θα υπάρχουν κλιματικές αλλαγές έγινε εκτίμηση του αποθέματος του SOC. Οι παραπάνω προσομοιώσεις που έγιναν έδωσαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στους Πίνακες 4.6 και 4.7 αντίστοιχα για τις τρεις λιθολογίες. Όσον αφορά την πρώτη προσομοίωση η οποία περιλαμβάνει την μετατροπή από θαμνότοπους σε καλλιέργειες παρατηρήθηκε ότι το διάστημα 1990-2010 το SOC θα αυξηθεί κατά 11,2 t/ha στους σχιστόλιθους, ενώ θα μειωθεί κατά 20,58 t/ha και 12,32 t/ha στις μάργες και τους ασβεστόλιθους αντίστοιχα, δηλαδή ως ποσοστά του αρχικού SOC 27,94%, 18,24% και 12,18% αντίστοιχα. Λόγω κλιματικών αλλαγών τα έτη 2010-2030 οι σχιστόλιθοι θα δεσμεύσουν 1,64 t/ha άνθρακα λιγότερο, ενώ τα έτη 2030-2050 1,54 t/ha άνθρακα λιγότερο, δηλαδή το 4,08% και 3,85% της αρχικής ποσότητας SOC. Αντίστοιχα, για τις μάργες θα δεσμευτούν 3 t/ha περίπου άνθρακα λιγότερο, δηλαδή το 2,6% περίπου της αρχικής ποσότητας SOC. Τέλος, για τους ασβεστόλιθους θα δεσμευτούν 1,75 t/ha άνθρακα και 1,89 t/ha άνθρακα λιγότερο κατά τις αντίστοιχες εικοσαετίες που αντιστοιχούν στο 1,73% και 1,87% της αρχικής ποσότητας SOC. Από την άλλη μεριά, όσον αφορά τη δεύτερη προσομοίωση, όπου θεωρείται ότι το έδαφος καλλιεργούταν ήδη για 50 χρόνια, παρατηρείται ότι το διάστημα 1990-2010 το SOC πάλι θα αυξηθεί στους σχιστόλιθους, ενώ θα μειωθεί στις μάργες και τους ασβεστόλιθους κατά 5 t/ha, 2,25 t/ha και 1,30 t/ha αντίστοιχα, δηλαδή εκφρασμένα σε ποσοστά της αρχικής ποσότητας SOC 8,85%, 3,09% και 1,69% αντίστοιχα.

Πίνακας 4.6 Η επιρροή των κλιματικών αλλαγών στα αποθέματα SOC μετά τη μετάβαση των πεδίων από θαμνότοπους σε καλλιέργειες ελιών.

	Schists		**Marls**		**Trypalis**	
Initial SOC, t C/ha	40.08		112.80		101.10	
SOC change-20 years cultivation, t C/ha	11.20		-20.58		-12.32	
SOC change-20 years cultivation, % of initial SOC	27.94		-18.24		-12.18	
Climate effect on change, % (less sequestration)	**mean**	**mean+std**	**mean**	**mean+std**	**mean**	**mean+std**
2010-2030	14.61	30.62	14.14	29.24	14.19	29.21
2030-2050	13.78	26.21	14.45	26.63	15.36	27.20
Less sequestration (20 years) due to climate change, t/ha						
2010-2030	1.64	3.43	2.91	6.02	1.75	3.60
2030-2050	1.54	2.94	2.97	5.48	1.89	3.35
Less sequestration (20 years) due to climate change, % of initial SOC						
2010-2030	4.08	8.55	2.58	5.33	1.73	3.56
2030-2050	3.85	7.32	2.64	4.86	1.87	3.31

Πίνακας 4.7 Η επιρροή των κλιματικών αλλαγών στα αποθέματα SOC σε πεδία που καλλιεργούνται με ελιές για ήδη 50 χρόνια.

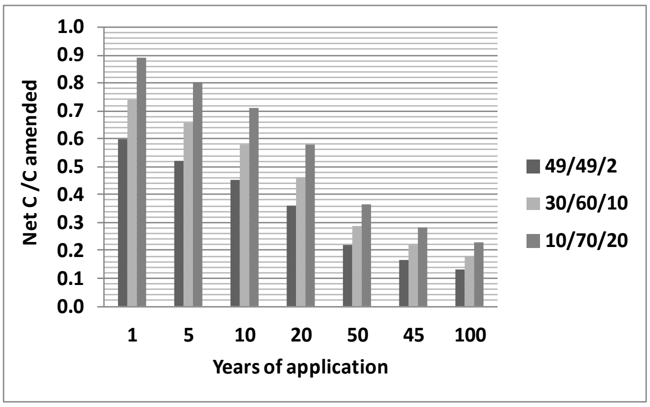
	Schists		**Marls**		**Trypalis**	
Initial SOC, t C/ha	56.49		73.05		76.84	
SOC change-20 years cultivation, t C/ha	5.00		-2.25		-1.30	
SOC change-20 years cultivation, % of initial SOC	8.85		-3.09		-1.69	
Climate effect on change, % (less sequestration)	**mean**	**mean+std**	**mean**	**mean+std**	**mean**	**mean+std**
2010-2030	38.69	42.45	95.28	101.73	111.54	118.12
2030-2050	36.37	33.12	97.66	81.40	121.29	92.69
Less sequestration (20 years) due to climate change, t/ha						
2010-2030	1.93	4.06	2.15	4.44	1.45	2.99
2030-2050	1.82	3.47	2.20	4.04	1.58	2.79
Less sequestration (20 years) due to climate change, % of initial SOC						
2010-2030	3.42	7.18	2.94	6.08	1.89	3.89
2030-2050	3.22	6.15	3.01	5.52	2.05	3.62

Η μέση τιμή της ετήσιας αποικοδόμησης την εικοσαετία 2010-2030 φαίνεται να μειώθηκε κατά 0,4% σύμφωνα με το σενάριο BCA-RCA, ενώ φαίνεται να αυξήθηκε κατά 9,8% και 5,1% σύμφωνα με τα σενάρια ECHAM-RACMO και ECHAM-REMO αντίστοιχα. Παρομοίως, την εικοσαετία 2030-2050 παρατηρήθηκε αύξηση κατά 0,4%, 8,0% και 6,9% αντίστοιχα. Η μέση τιμή των τριών σεναρίων για την εικοσαετία 2010-2030 ήταν 4,8% και για την εικοσαετία 2030-2050 ήταν 5,1%.

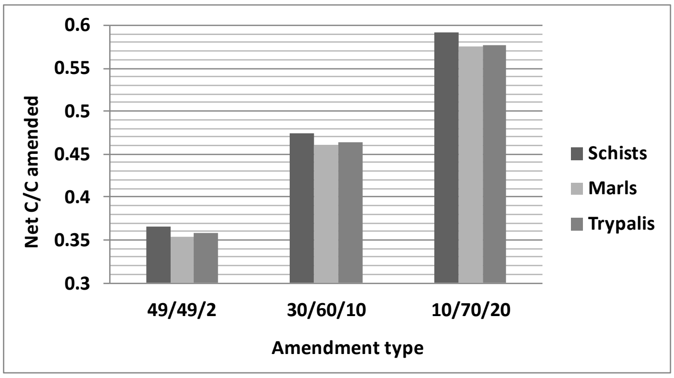
4.7 Σενάριο προσθήκης εδαφοβελτιωτικών παράλληλα με κλιματικές αλλαγές

Με την εισαγωγή στο μοντέλο των τριών διαφορετικών εδαφοβελτιωτικών όσον αφορά την ποιότητά τους (49/49/2), (30/60/10) και (10/70/20), έγινε εκτίμηση της αποτελεσματικότητάς τους με τη βοήθεια του λόγου του δικτύου του άνθρακα που συσσωρεύεται συγκριτικά με το έδαφος στο οποίο δεν έγινε προσθήκη εδαφοβελτιωτικών (Net C) προς το συσσωρευμένο άνθρακα από τα εδαφοβελτιωτικά (C amended). Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης φαίνονται στο Σχήμα 4.3. Ο λόγος αυτός ήταν μεγαλύτερος σε όλες τις τοποθεσίες για την κομπόστα 10/70/20 και ακολούθως για το 30/60/10 κατά 1,6 και 1,3 φορές από το 49/49/2. Στο Σχήμα 4.4

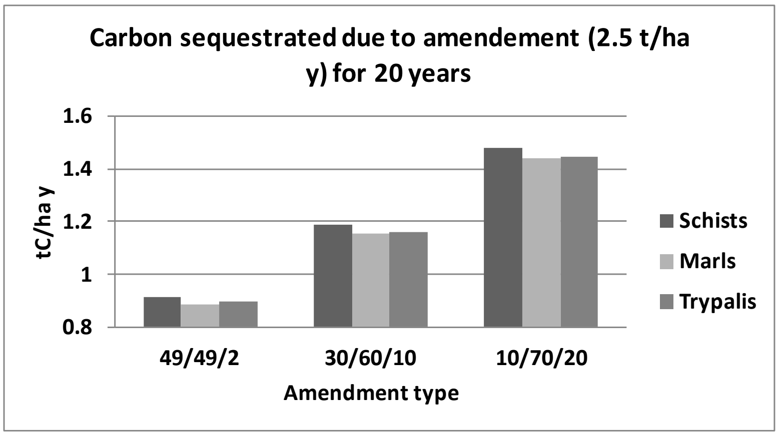
φαίνεται ότι για κάθε εδαφοβελτιωτικό, ο άνθρακας που συσσωρευόταν με την προσθήκη 2,5 t/ha y εδαφοβελτιωτικών για 20 χρόνια ήταν περισσότερος στο σχιστόλιθο και ακολούθως στους ασβεστόλιθους και τις μάργες. Τέλος, παράλληλα και λόγω των κλιματικών αλλαγών τα αποτελέσματα έδειξαν πως 0,35 έως και 0,8 tC/ha λιγότεροι θα συσσωρευτούν από τη μέγιστη συσσώρευση που μπορεί να γίνει για κάθε εδαφοβελτιωτικό (18 tC/ha θα συσσωρευτούν με το 49/49/2, 23 tC/ha με το 30/60/10 και 29 tC/ha με το 10/70/20). Τα τελευταία φαίνονται σχηματικά στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.3 Η αποτελεσματικότητα της προσθήκης άνθρακα με την εφαρμογή εδαφοβελτιωτικών διαφορετικής ποιότητας σε ετήσιες δόσεις των 2.5 tC/ha στα εδάφη τρυπαλίου (C amended: το σωρευτικό φορτίο του άνθρακα από τα εδαφοβελτιωτικά, Net C: ο επιπλέον άνθρακας που συσσωρεύεται συγκριτικά με το έδαφος στο οποίο δεν έγινε προσθήκη εδαφοβελτιωτικών)



Σχήμα 4.4 Η αποτελεσματικότητα της προσθήκης άνθρακα με την εφαρμογή εδαφοβελτιωτικών διαφορετικής ποιότητας σε ετήσιες δόσεις των of 2.5 tC/ha για 20 χρόνια στα εδάφη των σχιστόλιθων, των μαργών και του τριπαλίου.



Σχήμα 4.5 Ο μέσος όρος του ρυθμού συσσώρευσης εξαιτίας της εφαρμογής εδαφοβελτιωτικών διαφορετικής ποιότητας σε ετήσιες δόσεις των of 2.5 tC/ha για 20 χρόνια στα εδάφη των σχιστόλιθων, των μαργών και του τριπαλίου.

5. Συμπεράσματα

Στα αποτελέσματα της βαθμονόμησης ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή (std/mean) ήταν μικρότερος από το 10%, και επιβεβαίωσε πως είχε γίνει ικανοποιητική προσομοίωση, ενώ το ίδιο έδειχνε και η πολύ κοντινή τιμή της μέσης τιμής (mean) στη βαθμονομημένη τιμή (optimum).

Στην ανάλυση ευαισθησίας, από τα γραφήματα ανεμοστρόβιλου, φαίνεται πως για κάθε τοποθεσία η παράμετρος που παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία όσον αφορά την προσομοίωση του POM ήταν η εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων. Το γεγονός αυτό είναι λογικό εφόσον αυτή η εισαγωγή είναι αυτή η οποία κατά βάση ορίζει την εισαγωγή οργανικού άνθρακα στο έδαφος. Επομένως, ακόμη και μικρή αλλαγή στην τιμή του μπορεί να δώσει πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Στο βαθμό ευαισθησίας ακολουθούν ο ρυθμός αποδόμησης του RPM όσον αφορά το σχιστόλιθο και αυτός του HUM όσον αφορά τις μάργες και τους ασβεστόλιθους, ενώ και στις δύο τελευταίες λιθολογίες ο ρυθμός αποδόμησης του RPM εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία. Από την άλλη μεριά, και στις τρεις λιθολογίες ο ρυθμός αποδόμησης του DPM και του BIO ακολούθως παρουσιάζουν τη μικρότερη ευαισθησία.

Κατά τη διαδικασία της ανάλυση αβεβαιότητας, η σύγκριση της βέλτιστης τιμής που προέκυψε από την προσομοίωση του SOC και του POM και της μέσης τιμής που προέκυψε από τις τιμές των συνδυασμών που ανήκαν στο ±5% των τιμών του πεδίου για το SOC και το POM δεν έδειξε σημαντικές διαφορές. Αυτές, ωστόσο, οι μικρές διαφορές οφείλονται στις αρχικές συνθήκες του μοντέλου (δεξαμενές SOC, DPM, RPM, BIO, HUM και IOM), στα δεδομένα εισαγωγής (εισαγωγή φυτικών υπολειμμάτων και περιεκτικότητα του εδάφους σε άργιλο) και στις έξι παραμέτρους του μοντέλου (ρυθμοί αποδόμησης του DPM, RPM, BIO και HUM, λόγος $\frac{DPM}{RPM}$ και BIO%).

- Η παρατηρούμενη αύξηση του SOC στους σχιστόλιθους, όπως φαίνεται και στους πίνακες 1 και 2, έναντι της μείωσης αυτού στις μάργες και τους ασβεστόλιθους πολύ πιθανό να αποδίδεται στην αυξημένη προσφορά φυτικών υπολειμμάτων στο έδαφος, που προέρχονται από τις καλλιέργειες ελιάς, σε σύγκριση με τη χαμηλότερη προσφορά οργανικών φυτικών λειψάνων από τους θαμνότοπους. Η παραγωγή βιομάζας είναι μικρότερη στους σχιστόλιθους από ότι στις μάργες και τους ασβεστόλιθους γεγονός που δημιουργεί πιθανόν νέο πεδίο περαιτέρω έρευνας.

- Οι μέσες τιμές των εικοσαετιών 2010-2030 και 2030-2050 συγκρίθηκαν με τη μέση τιμή της τωρινής εικοσαετίας 1990-2010 προκειμένου να εκτιμηθούν οι αλλαγές στην περιεκτικότητα του SOC λόγω των κλιματικών αλλαγών. Η ποσότητα άνθρακα (t/ha) που συσσωρεύτηκε εξαιτίας των κλιματικών αλλαγών ήταν χαμηλότερη στους σχιστόλιθους και υψηλότερη στις μάργες και στους ασβεστόλιθους στα ήδη υποβαθμισμένα εδάφη σε σύγκριση με τη μετατροπή των εδαφών από θαμνότοπους σε καλλιέργειες. Αυτό οφείλεται πιθανών στις διαφορές των λιθολογιών. Τα εδάφη σε σχιστολιθικά μητρικά πετρώματα δείχνουν χαμηλή παραγωγικότητα φυτικών λειψάνων όταν είναι ακαλλιέργητα σε σύγκριση με αυτά που αναπτύσσονται σε ασβεστολιθικά και ασβεστομαργαικά πετρώματα. Αισθητή διαφορά μεταξύ των εδαφών αυτών φαίνεται και στο pH που μετρήθηκε. Στους ασβεστολίθους και στις μάργες έχουμε pH αλκαλικό (7.5-8) ενώ αυτά σε σχιστολίθους είναι όξινα (5.5-6.5). Η βιολογική δράση ευνοείται στα αλκαλικά εδάφη.

- Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της προσθήκης εδαφοβελτιωτικών, αυτή φάνηκε να είναι μεγαλύτερη για την κομπόστα 10/70/20 και ακολούθως για το 30/60/10 κα το 49/49/2 εδαφοβελτιωτικό, βάσει του υπολογισμού του λόγου $\frac{\textbf{Net C}}{\textbf{C amended}}$ και όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.3 και 4.4. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν αναμενόμενα καθώς μέσα από τους αριθμούς που εκφράζουν τα εδαφοβελτιωτικά και δείχνουν με τη σειρά την ποσότητα του DPM, του RPM και του HUM φαίνεται πως το 10/70/20 έχει τη λιγότερη ποσότητα DPM και επομένως λιγότερο οργανικό υλικό προς σταθεροποίηση. Ενώ παράλληλα, έχει τη μεγαλύτερη ποσότητα RPM. Ωστόσο, η προσθήκη και των τριών εδαφοβελτιωτικών παρουσιάζει λογαριθμική μείωση του τροποποιημένου άνθρακα με το χρόνο γεγονός το οποίο καθιστά επιτακτική την ανάγκη για προσομοίωση ώστε να γίνει σωστή διαχείριση των αγροτικών πρακτικών.

- Αναφορικά με τη λιθολογία, η αποτελεσματικότητα της προσθήκης εδαφοβελτιωτικών ήταν υψηλότερη στους ασβεστόλιθους από ότι στις άλλες δύο λιθολογίες εξαιτίας του χαμηλότερου ρυθμού αποδόμησης της δεξαμενής του HUM στους ασβεστόλιθους ο οποίος συνδέεται πιθανόν με την υψηλότερη περιεκτικότητά τους σε άργιλο. Στα πιο ανδρόκκοκα εδάφη η αποδόμηση της οργανικής ύλης σε RPM πιθανών να μη συνοδεύεται και με αποτελεσματική ενσωμάτωση στο έδαφος με αποτέλεσμα να διαβρώνεται.

- -Τελικώς, μπορούμε να πούμε ότι τα αποτελέσματα εμφανώς δείχνουν πως οι επιπτώσεις των διαχειριστικών πρακτικών και ειδικά οι επιπτώσεις της αλλαγής χρήσης γης είναι τόσο έντονες που μπορεί να παρεμποδίζουν την ικανότητά μας να προβλέψουμε τις αντίστοιχες επιπτώσεις λόγω κλιματικών αλλαγών που συμβαίνουν κατά την ίδια χρονική περίοδο με αυτές.

6.Βιβλιογραφία

Abiven, S., Menasseri, S., Angers, D.A., Leterme, P., 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials, European Journal of Soil Science 58, 239-247.

Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C., 2009. The effects of organic input over time on soil aggregate stability – a literature analysis. Soil Biology and Biochemistry 41, 1-12.

Adams, M., Crawford, J., Field, D., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., McBratney, A., de Remy de Courcelles, V., Singh, K., Stockmann, U., Wheeler., I., Compiled by Stockmann, U., 2001. Managing the soil-plant system to mitigate atmospheric CO2. Discussion paper for the Soil Carbon Sequestration Summit January 31-February 2 2011 55p.

Agren G. I. & Bosatta E., 1996. Quality: A bridge between theory and experiment in soil organic matter studies. Oikos, 76, 522-528.

Angers, D.A., Carter, M.R., 1996. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils, M.R. Carter, B.A. Stewart, Editors, Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils. Advances in Soil Science, Lewis-CRC Press, Boca Raton, FL (1996), pp. 193–211.

Antle, J., Capalbo, S., Mooney, S., Elliott, E. T., and Paustian, K. H. (2002). Sensitivity of carbon sequestration costs to soil carbon rates. Environmental Pollution 116, 413-422.

Arias, M.E., González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., Ball, A.S., 2005. Soil health—a new challenge for microbiologists and chemists. International Microbiology 8, 13-21.

Balesdent, J., Besnard, E., Arrouays D., Chenu, C., 1998. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. Plant Soil 201, 49–57.

Banwart, S., et al., 2011Assessing Soil Processes and Function across an International Network of Critical Zone Observatories: research hypotheses and experimental design. Vadose Zone Journal, Special Issue on Critical Zone Observatory Research (in review).

Bastida F., Moreno J.L., Hernández T., García C., 2006. Microbiological activity in a soil 15 years after its devegetation. Soil Biology and Biochemistry 38, 2503-2507.

Batlle-Aguilar, J., Brovelli, A., Porporato, A., and Barry, D.A., 2010. Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change: a review. Agronomy for Sustainable development (http://dx.doi.org/10.1051/agro/2010007).

Blum, W.E.H., 2005, Functions of soil for society and the environment. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology 4, 75–79.

Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.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.

Brantley, S.L., White, T.S., White, A.F., Sparks, D., Richter, D., Pregitzer, K., Derry, L., Chorover, J., Chadwick, O., April, R., Anderson, S., Amundson, R., 2006. Frontiers in exploration of the Critical Zone: Repost of a workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF), October 24-26, 2005, Newark, DE, 30p.

Carter, M. R. and Stewart, B. A. (1996). 'Structure and organic matter storage in agricultural soils.' (CRC Press: Boca Raton.)

Coleman K & DS Jenkinson, November 1999 issue (modified August 2008) RothC-26.3. A model for the turnover of carbon in soil. Model escription and windows users guide. Rothamsted Research, Harpenden, Herts, AL5 2JQ.

European Commission (2001) - Communication from the Commission: A Sustainable Europe for a BetterWorld: A European Union Strategy for Sustainable Development (Commission's proposal to the Gothenburg European Council) (COM(2001)264).

European Commission (2006a) - Thematic Strategy for Soil Protection Communication (COM(2006)231).

Dalal, R.C., Bridge, B.J., 1996, Aggregation and organic matter storage in sub-humid and semi-arid soils, M.R. Carter, B.A. Stewart, Editors , Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils. Advances in Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton, FL (1996), pp. 263–307.

Don, A., Scholten, T., Schulze E.D., 2009. Conversion of cropland into grassland: Implications for soil organic-carbon stocks in two soils with different texture. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 172, 53–62.

Doran , J. W. and Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In ‘Defining soil quality for sustainable environment. Vol. 35.’(Eds J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart.) pp.3-21. (Soil Science Society of America: Madison, WI.)

Doran , J. W. and Safley, M. (1997). Defining and assessing soil health and sustainable prodactivity. In ‘Biological Indicators of Soil Health. (Eds C. E. Pankhurst, B. M. Doube, and V. V. S. R. Gupta.) pp. 1-28. (CAB International: New York.)

Elliott, E.T., 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 627-633.

Elliott, E. T. (1997). Rationale for developing bioindicators of soil health. In ‘Biological Indicators of Soil Health. (Eds C. E. Pankhurst, B. M. Doube, and V. V. S. R. Gupta.) pp. 49-78. (CAB International: New York.)

Elliott, E.T., 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America Journal 50, 627–633.

Emadi, M., Baghernejad, M., Memarian, H.R., 2009. Effect of land-use change on soil fertility characteristics within water-stable aggregates of two cultivated soils in northern Iran. Land Use Policy 26, 452–457.

Falloon P, Smith P, Coleman K, and Marshall S (1998) Estimating the size of the inert organic matter pool for use in the Rothamsted carbon model. Soil Biology and Biochemistry 30: 1207-1211

Falloon, P.D., and Smith, P., 2000. Modelling refractory soil organic matter, Biol. Fertil. Soils 30: 388-398. Fioretto et al., 2003.

Galdo, I.D., Six, J., Peressotti, A., Cotrufo, M.F., 2003. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. Glob. Change Biol. 9: 1204–1213.

Gottschalk, P., Bellarby, J., Chenu, C., Foereid, B., Smith, P., Wattenbach, M., Zingore, S., Smith, J., 2010. Simulation of soil organic carbon response at forest cultivation sequences using 13C measurements. Org. Geochem. 41: 41–54.

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. Science of the Total Environment, 404, 297-307.

Grimm, M., Jones, R.J.A., Montanarella, L., 2002. Soil erosion risk in Europe. European Soil Bureau, Institute for Environment and Sustainability, JRC, Ispra, Italy, EUR 19939 EN.

Guo, L.B., Gifford, R.M., 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Glob. Change Biol. 8: 345–360.

Gupta, V.V.S.R, Germida, J.J., 1988. Distribution of microbial activity in different soil classes as affected by biomass and its aggregate size in cultivation. Soil Biology and Biochemistry 10, 777-786.

Haynes, R.J., Beare, M.H., 1996. Aggregation and organic matter storage in meso-thermal, humid soils. In: Carter MR, Stewart BA (eds) Advances in soil science. Structure and organic matter storage in agricultural soils. CRC Press, Boca Raton, Fla., pp 213–262.

Helfrich, M., Ludwig, B., Potthoff, M., Flessa, H., 2008. Effect of litter quality and soil fungi on macroaggregate dynamics and associated partitioning of litter carbon and nitrogen. Soil Biology and Biochemistry 40, 1823–1835.

Janzen, H. H., Larney, F. J., and Oslon, B. M. (1992). Soil quality factors of problem soils in Alberta. Proceedings of the Alberta Soil Science Workshop 17-28.

Jastrow, J.D., 1996, Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. Soil Biology and Biochemistry 28, 665-676.

Jastrow, J.D., Amonette, J.E., Bailey, V.L., 2007. Mechanisms controlling soil carbon turnover and their potential application for enhancing carbon sequestration, Climate change 80, 5-23.

Jenkinson DS, Harkness DD, Vance ED, Adams DE and Harrison AF (1992) Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. Soil Biology & Biochemistry 24(4), 295-308

Jenkinson DS, Hart PBS, Rayner JH and Parry LC (1987) Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. INTECOL Bulletin 15, 1-8
Jenkinson DS, Hart PBS, Rayner JH and Parry LC (1987) Modelling the turnover of organic
Juston, J., Andrén, O., Kätterer, T., Jansson, P.E., 2010. Uncertainty analyses for calibrating a soil carbon balance model to agricultural field trial data in Sweden and Kenya. Ecol. Model. 221: 1880-1888. Karlen, D. L., Ditzler, C.A., and Andrews, S. S. (2003). Soil quality: why and how? Geoderma 114, 145-156.

Kimetu, J.M., Lehmann, J., Kinyangi, J.M., Cheng, C.H., Thies, J., Mugendi, D.N., Pell, A., 2009. Soil organic C stabilization and thresholds in C saturation. Soil Biology and Biochemistry 41, 2100–2104.

Kirschbaum, M. U. F. 2000. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? Biogeochemistry, 48, 21-51.

Kleber M., Sollins P., Sutton R., 2007. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. Biogeochemistry 85, 9–24.

Krull Evelyn S., Skjemstad Jan O., Baldock Jeffrey A.,2004, Functions of Soil Organic Matter and the Effect on Soil Properties. GRDC report, Project CSO 00029.

Krull, E.S., Skjemstad, J.O., Burrows, W.H., Bray, S.G., Wynn, J.G., Bol, R. et al. 2005. Recent vegetation changes in central Queensland, Australia: Evidence from δ13C and 14C analyses of soil organic matter. Geoderma 12, 241–259.

Lal, R. (2002). Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. Environmental Pollution 116, 353-362.

Lal, R., 2004a. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma 123, 1–22.

Li X.G., Wang Z.F., Ma Q.F., Li F.M., 2007. Crop cultivation and intensive grazing affect organic C pools and aggregate stability in arid grassland soil. Soil and Tillage Research 95, 172-181.

Manzoni, S., and Porporato, A., 2009. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. Soil Biology and Biochemistry 41, 1355-1379.

matter in long-term experiments at Rothamsted. INTECOL Bulletin **15**, 1-8

Meentemeyer V. 1978. Macroclimate the lignin control o litter decomposition rates. Ecology, 59, 465-472.

Melillo J. M., Aber, J. D. & Muratore J. F. 1982. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. Ecology, 63, 621-626.

Melillo J., Aber J. Linkins A., Ricca A., Fry B. & Nadelhoffer K., 1989. Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: Plant litter to soil organic matter. Plant and Soil, 115, 189-198.

Minasny, B., McBratney, A.B., Salvador-Blanes, S., 2008. Quantitative models for pedogenesis – A review, Geoderma 144, 140-157.

Müller MJ (1982) Selected climatic data for a global set of standard stations for vegetation science. Dr. W. Junk, Publishers. The Hague

Nikolaidis, N.P., 2011, Human impacts on soils: Tipping points and knowledge gaps. Applied Geochemistry 26, S230–S233.

Nikolaidis, N.P., Bidoglio, G., 2011. Modeling of Soil Organic Matter and Structure Dynamics: A Synthesis Review. Geoderma (in review).

Norfleet, M. L., Ditzler, C. A., Grossman, R. B., and Shaw, J. N. (2003). Soil quality and its relationship to pedology. Soil Science 168, 149-155.

Parshotam A, Tate KR and Giltrap DJ (1995) Potential effects of climate and land use change on soil carbon and CO2 emissions from New Zealand's indigenous forests and unimproved grasslands. Weather and climate 15, 3-12.

Parton W., Silver W. L., Burke I. C., Grassens L., Harmon M. E., Currie W. S., King J. Y., Adair E. C., Brandt L. A., Hart S. C. & Fasth B. 2007. Global-Scale Similarities in Nitrogen Release Patterns During Long-Term Decomposition. Science, 315, 361-364.

Paul, K.I., Polglase, P.J., Richards, G.P., 2003. Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth (3PG), litter decomposition (GENDEC) and soil C turnover (RothC). Forest Ecol. Manag. 177: 485-501.

Plante, A.F., McGill, W.B., 2002. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. Soil and Tillage Research 66, 79–92.

Post, J., Krysanova, V., Suckow, F., Mirschel, W., Rogasik, J., Merbach, I., 2007. Integrated ecohydrological modeling of soil organic matter dynamics for the assessment of environmental change impacts in meso- and macro-scale river basins, Ecological Modeling 206, 93-109.

Potter, K.N. and Derner, J.D., 2006. Soil carbon pools in central Texas: Prairies, restored grasslands, and croplands. J. Soil Water Conserv. 61: 124-128.

RCEP., 1996. Sustainable Use of Soil. 19th report of the Royal Commission on Environmental Pollution. Cmnd 3165, HMSO, London.

Reeves, D. W. (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil & Tillage Research* **43**, 131- 167.

Saggar S, Tate KR, Feltham CF, Childs CW and Parshotam A (1996) Carbon turnover in a range of allophanic soils amended with 14C-labelled glucose. Soil Biology and Biochemistry 26, 1263-1271

Shibu, M.E., Leffelaar, P.A., Van Keulen, H., Aggarwal, P.K., 2006. Quantitative description of soil organic matter dynamics – A review of approaches with reference to rice-based cropping systems. Geoderma 137, 1-18.

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research 79, 7–31.

Six, J., Conant, R.T., Paul E.A., and Paustian, K., 2002a. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil 241, 155–176.

Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S.M., de Moraes, J.C., Alberecht, A., 2002b. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. Agronomie 22, 755–775.

SMITH, P., MARTINO, D., CAI, Z., GWARY, D., JANZEN, H., KUMAR, P., MCCARL, B., OGLE, S., O'MARA, F., RICE, C., SCHOLES, B. & SIROTENKO, O. 2007. Chapter 8: Agriculture. In: METZ, B., DAVIDSON, O. R., BOSCH, P. R., DAVE, R. & MEYER, L. A. (eds.) Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York. Soussana, J.F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., Arrouays, D., 2004. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. Soil Use Manage. 20: 219-230.

Smith, P., Powlson, D.S., Smith, J.U., Elliott, E.T., 1997. Evaluation and comparison of soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. Geoderma 81, 1-225.

Sommers LE, Gilmour CM, Wilding RE and Beck SM (1981). Effect of water potential and decomposition processes in soils. Water Potential Relations In Soil Microbiology 97-117. Special publication of the Soil Science Society of America No. 9, Madison.

Sparling GP, Cheshire MV and Mundie CM (1982). Effect of barley plants on the decomposition of 14C-labelled soil organic matter. Journal of Soil Science 33, 89-100.

Stamati, F.E., Nikolaidis, N.P., Schnoor, J.P., 2012. Modeling topsoil carbon sequestration in two contrasting crop production to set-aside conversions with RothC – calibration issues and uncertainty analysis. Agriculture Ecosystem and Environment (submitted revisions).

Fotini Stamati, 2012, Ph.D. Dissertation: Carbon and Nitrogen Cycling in Agricultural Lands. Department of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece.

Stockmann U., Adams M., Crawford J., Field D., Henakaarchchi N., Jenkins M., McBratney A., Viven de Remy de Courcelles, Singh K., Wheeler I., January 31-February 2011. Managing the soil-plant system to mitigate atmospheric CO2. Discussion paper for the Soil Carbon Sequestration Summit.

Tate KR, Giltrap DJ, Parshotam A, Hewitt AE, Ross DJ, Kenny GJ and Warrick RA (1996) Impacts of climate change on soils and land systems in New Zealand. In: Greenhouse: coping with Climate Change (Eds: Bouma WJ, Pearman GI & Manning MR) pp. 190- 204, CSIRO Publishing, Melbourne.

Van-Camp., L., Bujarrabal, B., Gentile, A-R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Olazabal, C. and Selvaradjou, S.K., 2004. Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection. EUR 21319 EN/1, 872 pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B., 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. Soil Biology and Biochemistry 39, 2183-2207.

Wagai, R., Mayer, L.M., Kitayama, K., Knicker, H., 2008. Climate and parent material controls on organic matter storage in surface soils: three-pool, density-separation approach. Geoderma 147, 23-33.

Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M.W.I., Smith, P., Fuhrer, J., 2007. Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. European Journal of Soil Science 58, 658–667.