



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

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

**Δέσμευση Άνθρακα στο Έδαφος: Ποσοτική Αξιολόγηση
Πρακτικών Αναγεννητικής Γεωργίας**

ΦΡΙΝΤΑ ΤΣΕΡΑ

Πειραιάς, Μάιος 2026



UNIVERSITY OF PIREAUS
SCHOOL OF ECONOMICS, BUSINESS AND INTERNATIONAL STUDIES
DEPARTMENT OF ECONOMICS

**MSc. IN BIOECONOMY, CIRCULAR ECONOMY AND
SYSTAINABLE DEVELOPMENT**

**Soil Carbon Sequestration: Quantitative Assessment of
Regenerative Agriculture Practices**

FRINTA TSERA

Piraeus, Greece – May 2026

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

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

Στην οικογένεια μου.

Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, επίκουρο καθηγητή Ανέστη Βλυσίδη, για την καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Εμ. Ψωμιάδη (Επίκουρο Καθηγητή), κ. Αντ. Καββαδία (Ερευνητή) και κ. Ι. Χαραλαμπίδου (ΕΔΙΠ) από το Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, οι οποίοι μοιράστηκαν την έρευνα τους, δίνοντας μου την δυνατότητα να την αξιοποιήσω ως βασική περιοχή μελέτης στην ανάλυση μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στον κ. Γιώργο Λόκκα για την καθοδήγηση του στον τομέα της Εθελοντικής Αγοράς Άνθρακα, στο πλαίσιο της πρακτικής άσκησης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την συνεχή στήριξη και ενθάρρυνση που μου προσέφεραν.

Περίληψη

Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής έχει ήδη παρουσιάσει τις αρνητικές επιπτώσεις σε όλα τα οικοσυστήματα και ο μετριασμός τους είναι, περισσότερο από ποτέ, αναγκαίος. Στο πλαίσιο αυτό, ο γεωργικός τομέας, ενώ εκπέμπει αέρια του θερμοκηπίου από την παραγωγική του διαδικασία, διαφοροποιείται από τους άλλους τομείς, όπως η βιομηχανία, η ναυτιλία, κλπ., καθώς αποτελεί και έναν φυσικό μηχανισμό δέσμευσης άνθρακα μέσω της διαχείρισης των εδαφικών πόρων. Ο μηχανισμός αυτός γίνεται ισχυρότερος όταν υιοθετούνται βιώσιμες διαχειριστικές πρακτικές που μπορούν να μετατρέψουν τη γεωργία από πηγή εκπομπών σε ενεργό δεξαμενή δέσμευσης άνθρακα. Η αναγεννητική γεωργία αποτελεί μια βιώσιμη, εναλλακτική και ολιστική προσέγγιση για τη διαχείριση των καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Οι αρχές της αναγεννητικής γεωργίας περιλαμβάνουν την αποκατάσταση της λειτουργίας του εδάφους, την ενίσχυση της βιοποικιλότητας και τη βελτίωση της μακροχρόνιας ανθεκτικότητας των συστημάτων.

Η παρούσα εργασία εξετάζει τον ρόλο των αναγεννητικών πρακτικών στη δέσμευση οργανικού άνθρακα στο έδαφος, με έμφαση στις δενδρώδεις καλλιέργειες και ειδικότερα στους μεσογειακούς ελαιώνες. Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της αναγεννητικής γεωργίας και η σύνδεση της με τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης. Στη συνέχεια, αναλύεται η σημασία του εδαφικού άνθρακα για τη λειτουργικότητα του εδάφους και εξετάζονται οι βασικές αναγεννητικές πρακτικές διαχείρισης όπως η μόνιμη χορτοκάλυψη, η μειωμένη κατεργασία του εδάφους, η αξιοποίηση οργανικών εισροών, κ.λπ.

Στο μεθοδολογικό μέρος της εργασίας, εφαρμόζεται η μεθοδολογία του IPCC σχετικά με τα αποθέματα οργανικού άνθρακα, για την εκτίμηση της μεταβολής του αποθέματος οργανικού άνθρακα (SOC) σε μια μελέτη περίπτωσης ελαιώνα που βρίσκεται στην Πελοπόννησο, στην Ελλάδα. Η ανάλυση βασίζεται σε τυποποιημένους συντελεστές σύμφωνα με το Tier 1 του IPCC, προκειμένου να εκτιμηθεί η μεταβολή της δέσμευσης οργανικού άνθρακα, συγκριτικά με ένα συμβατικό σενάριο διαχείρισης.

Παράλληλα η εργασία εξετάζει τη δυνατότητα σύνδεσης των πρακτικών αυτών με τις αγορές άνθρακα (carbon markets), αναδεικνύοντας τον ρόλο των πιστώσεων άνθρακα (carbon credits) ως ενός πιθανού οικονομικού κινήτρου για την υιοθέτηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών. Η ενσωμάτωση της γεωργίας στις αγορές άνθρακα μπορεί να συμβάλει τόσο στην ενίσχυση του εισοδήματος των παραγωγών όσο και στην επίτευξη των στόχων μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη σημασία των πρακτικών διαχείρισης του εδάφους για την ενίσχυση της δέσμευσης άνθρακα και τη συμβολή της γεωργίας στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

Σημαντικοί όροι: Κλιματική αλλαγή, οργανικός άνθρακας εδάφους, αναγεννητική γεωργία, δέσμευτική ικανότητα, μονάδες πίστωσης άνθρακα, εθελοντική αγορά πιστώσεων άνθρακα.

Abstract

Climate change has already shown its negative impact on ecosystems, making their mitigation more necessary than ever. In this context, the agricultural sector, while emitting greenhouse gases through its production processes, differs from other sectors such as industry and shipping, as it also functions as a natural mechanism for carbon sequestration through the management of soil resources. This mechanism becomes stronger when sustainable management practices are adopted, which can transform agriculture from a source of emissions into an active carbon sink.

Regenerative agriculture represents a sustainable, alternative, and holistic approach to the management of agricultural land. Its principles include the restoration of soil functions, the enhancement of biodiversity, and the improvement of the long-term resilience of agricultural systems.

This thesis examines the role of regenerative practices in soil organic carbon sequestration, with a focus on tree crops and particularly Mediterranean olive groves. First, the theoretical framework of regenerative agriculture and its connection with the Sustainable Development Goals are presented. Then, the importance of soil carbon for soil functionality is analyzed, and key regenerative management practices are examined, such as permanent ground cover, reduced tillage, and the use of organic inputs.

In the methodological part of the study, the IPCC methodology for soil organic carbon stocks is applied to estimate changes in soil organic carbon (SOC) in a case study of an olive grove located in the Peloponnese, Greece. The analysis is based on standardized factors according to the IPCC Tier 1 approach, in order to estimate changes in carbon sequestration compared to a conventional management scenario.

At the same time, the study explores the potential integration of these practices into carbon markets, highlighting the role of carbon credits as a possible economic incentive for the adoption of sustainable agricultural practices. The inclusion of agriculture in carbon markets could contribute both to enhancing farmers' income and to achieving climate change mitigation goals.

The results highlight the importance of soil management practices in enhancing carbon sequestration and demonstrate the contribution of agriculture to climate change mitigation.

Keywords: Climate change, soil organic carbon, regenerative agriculture, carbon sequestration capacity, carbon credits, Voluntary Carbon Market.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων.....	15
Κατάλογος Πινάκων.....	17
Κατάλογος Παραρτημάτων	18
Κεφάλαιο 1 ^ο Εισαγωγή.....	19
1.1 Το πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και ο ρόλος της γεωργίας.....	19
1.2 Η γεωργία ως εργαλείο μετριασμού και προσαρμογής στη κλιματική αλλαγή.....	21
1.3 Σκοπός και στόχοι της παρούσας διπλωματικής	24
Κεφάλαιο 2 ^ο Αναγεννητική Γεωργία	26
2.1 Ορισμός της Αναγεννητικής Γεωργίας	26
2.2. Προκλήσεις της αναγεννητικής γεωργίας	27
2.3 Επιδιώξεις και αρχές της αναγεννητικής γεωργίας.....	28
2.4 Ιστορική εξέλιξη	29
2.5 Η αναγεννητική γεωργία στο πλαίσιο της κλιματικής πολιτικής	30
2.6 Σύνδεση αναγεννητικών πρακτικών με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) ..	32
Κεφάλαιο 3 ^ο Έδαφος, οργανικός άνθρακας και αναγεννητική διαχείριση	34
3.1 Εδαφική οργανική ύλη (SOM) και εδαφικός οργανικός άνθρακας (SOC)	34
3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη δέσμευση άνθρακα στο έδαφος	37
3.3 Πρακτικές αναγεννητικής γεωργίας σε δενδρώδεις καλλιέργειες	38
3.3.1 Μόνιμη χορτοκάλυψη	38
3.3.2 Μειωμένη ή μηδενική κατεργασία	40
3.3.3 Διαχείριση οργανικών εισροών στο έδαφος: κλαδευτική βιομάζα, οργανική λίπανση και κομποστοποίηση	41
3.3.4 Αύξηση βιοποικιλότητας: πολυκαλλιέργειες και λειτουργική ποικιλότητα	42
3.3.5 Ενσωμάτωση ζώων	43
3.3.6 Μείωση της χρήσης συνθετικών λιπασμάτων	43
3.4 Οφέλη της Αναγεννητικής Γεωργίας	43
3.5 Δυναμικό δέσμευσης άνθρακα των αναγεννητικών πρακτικών	44
3.6 Περιορισμοί και εμπόδια εφαρμογής.....	46
Κεφάλαιο 4 ^ο Υπολογισμός της Μεταβολής Αποθέματος Οργανικού Άνθρακα Εδάφους (ΔSOC) από Μεταβολή Διαχείρισης σε Μεσογειακό Ελαιώνα	47

4.1 Στόχος, ερευνητικό ερώτημα και ορισμός της μεταβολής	48
4.3 Πλαίσιο Ανάλυσης και ορισμός σεναρίων	50
4.3.1 Χωρικά και χρονικά όρια ανάλυσης	50
4.3.3 Παραδοχές μοντέλου	50
4.3.4 Ορισμός συμβατικής και αναγεννητικής διαχείρισης	51
4.3 Μεθοδολογία IPCC για SOC	52
4.4 Υπολογισμός του αποθέματος αναφοράς (SOC _{ref})	53
https://data.apps.fao.org/glois/	56
4.4.1 Παραμετροποίηση συμβατικού σεναρίου (Baseline)	57
4.4.2 Παραμετροποίηση αναγεννητικού σεναρίου (Regenerative)	58
4.4.3 Υπολογισμός αποθεμάτων και μεταβολής SOC	59
4.5 Συζήτηση Αποτελεσμάτων	60
4.6 Εκτίμηση εθνικού δυναμικού δέσμευσης οργανικού άνθρακα με βάση χωρική ετερογένεια	61
Κεφάλαιο 5° Δυνατότητα ένταξης στην εθελοντική αγορά πιστώσεων άνθρακα	68
5.1 Μονάδες πιστώσεων άνθρακα	68
5.2 Τιμολόγηση άνθρακα	69
5.3 Πρόσφατες εξελίξεις στην τιμολόγηση άνθρακα και στις αγορές πιστώσεων άνθρακα (2024-2025)	71
5.4 Κριτήρια αξιοπιστίας	73
5.4.1 Προσθετικότητα	73
5.4.2 Μονιμότητα και κίνδυνος αντιστροφής	74
5.4.3 Ποσοτικοποίηση	74
5.4.4 Ανεξάρτητη επαλήθευση	75
5.4.5 Αποφυγή διπλής καταμέτρησης	75
5.4.6 Διαφάνεια	75
5.5 Δράσεις δέσμευσης άνθρακα στον αγροτικό τομέα της Ευρώπης	75
Κεφάλαιο 6° Συμπεράσματα	77
Ξένη βιβλιογραφία	79
Ελληνική Βιβλιογραφία	85

Παράρτημα Α: Περιεκτικότητα στοιχειακού άνθρακα στην ξηρή φυτική βιομάζα των δενδρωδών καλλιεργειών	86
Παράρτημα Β: Χάρτες εδαφικών χαρακτηριστικών Ευρώπης.....	87
Παράρτημα Γ – Πίνακες παραμέτρων IPCC για τον υπολογισμό SOC	90
Παράρτημα Δ – Συνολική έκταση ελαιώνων	93

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Ροές αερίων του θερμοκηπίου και μεταβολές άνθρακα στις δεξαμενές άνθρακα ...	20
Σχήμα 2: Παγκόσμιες (a) και περιφερειακές (b) τάσεις εκπομπών και απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα AFOLU	22
Σχήμα 3: Εκπομπές και απορροφήσεις αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (1990-2023) (εκατομμύρια τόνοι ισοδυνάμου CO ₂)	23
Σχήμα 4. Κατανομή των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα δραστηριότητας	27
Σχήμα 5: Οι πέντε θεμελιώδεις αρχές της αναγεννητικής γεωργίας και η μεταξύ τους αλληλοεξαρτώμενη σχέση	29
Σχήμα 6: Σχέση παγκόσμιων εκπομπών CO ₂ και δυναμικού αύξησης του εδαφικού οργανικού άνθρακα (πρωτοβουλία 4%)	32
Σχήμα 7: Απλουστευμένη αναπαράσταση του πλανητικού κύκλου άνθρακα, η οποία αναδεικνύει τις δεξαμενές άνθρακα που αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα. Οι αριθμοί στα πλαίσια εκφράζουν Pg άνθρακα αποθηκευμένου στις μείζονες δεξαμενές	34
Σχήμα 8: Διαδικασίες μετασχηματισμού των υλικών του εδάφους και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δεξαμενών άνθρακα της βλάστησης, των μικροοργανισμών και του εδάφους. Το μπλε, καφέ και μωβ πλαίσιο αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τις δεξαμενές άνθρακα της βλάστησης, του εδάφους και των μικροοργανισμών. Οι γραμμές απεικονίζουν τις ροές άνθρακα μεταξύ των δεξαμενών	36
Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση των επιδράσεων της χορτοκάλυψης (cover crops) στη λειτουργικότητα του εδάφους και στην αύξηση του οργανικού άνθρακα εδάφους μέσω φωτοσύνθεσης, ριζικών εκκρίσεων και αποδόμησης φυτικών υπολειμμάτων.....	39
Σχήμα 10: Απεικόνιση της επίδρασης διαφορετικής έντασης κατεργασίας στην δομή και την βιολογική δραστηριότητα του εδάφους	40
Σχήμα 11: Μέσοι ρυθμοί δέσμευσης οργανικού άνθρακα στο έδαφος ανά πρακτική και κατηγορία χρήσης γης	45
Σχήμα 12: Χωρική θέση της πόλης Ζαχάρωσ στην Πελοπόννησο, Ελλάδα, και της περιοχής μελέτης (κόκκινο πλαίσιο)	47

Σχήμα 13: Παγκόσμια κατανομή των κύριων κατηγοριών εδάφους σύμφωνα με την ταξινόμηση του IPCC	54
Σχήμα 14: Παγκόσμια κατανομή αποθεμάτων οργανικού άνθρακα στο έδαφος και θέση της περιοχής μελέτης	56
Σχήμα 15: Χάρτης Κάλυψης Γης βάσει δεδομένων CORINE Land Cover 2018 (CLC 2018). Με καφέ χρώμα απεικονίζονται οι εκτάσεις ελαιώνων (CORINE class: Olive groves)	62
Σχήμα 16: (α) Αποτύπωση δεδομένων στο QGIS και (β) Εφαρμογή φίλτρου για εμφάνιση ελαιώνων	63
Σχήμα 17: Αποθέματα οργανικού άνθρακα στο έδαφος στην περιοχή της Μεσσηνίας	64
Σχήμα 18: Αποθέματα οργανικού άνθρακα στο έδαφος στην περιοχή της Λακωνίας	64
Σχήμα 19: Αποθέματα οργανικού άνθρακα στο έδαφος στην περιοχή της Κρήτης	65
Σχήμα 20: Αποθέματα οργανικού άνθρακα στο έδαφος στην περιοχή της Λέσβος	65
Σχήμα 21. Εκπομπές CO ₂ από την παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα για την περίοδο 2010-2021 (σε εκατομμύρια τόνους CO ₂ - Mt CO ₂)	67
Σχήμα 22: Τιμές πιστώσεων άνθρακα (carbon credits) ανά τύπο έργου στην εθελοντική αγορά άνθρακα για την περίοδο 2022–2025	70
Σχήμα 23:Ετήσιες εκδόσεις και αποσύρσεις ανά είδος έργου (MtCO ₂ e)	72
Σχήμα 24: Ετήσια ζήτηση ανά είδος έργου	72

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες εδαφών που χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία IPCC	55
Πίνακας 4.2: Τιμές συντελεστών για το συμβατικό σενάριο σύμφωνα με τη μεθοδολογία του IPCC	57
Πίνακας 4.3: Τιμές συντελεστών για το αναγεννητικό σενάριο σύμφωνα με τη μεθοδολογία του IPCC	58

Κατάλογος Παραρτημάτων

Παράρτημα Α: Περιεκτικότητα στοιχειακού άνθρακα στην ξηρή φυτική βιομάζα των δενδρωδών καλλιεργειών	86
Παράρτημα Β: Χάρτες εδαφικών χαρακτηριστικών Ευρώπης	
Παράρτημα Β1: Χάρτης χωρικής κατανομής ποσοστού αργίλου (%) στα εδάφη της Ευρώπης	87
Παράρτημα Β2: Χάρτης χωρικής κατανομής ποσοστού άμμου (%) στα εδάφη της Ευρώπης	88
Παράρτημα Β3: Χάρτης χωρικής κατανομής ποσοστού ιλύος (%) στα εδάφη της Ευρώπης	89
Παράρτημα Γ: Πίνακες παραμέτρων IPCC για τον υπολογισμό SOC	
Παράρτημα Γ1: Πίνακες τιμών αναφοράς οργανικού άνθρακα εδάφους (SOC _{ref}) για ορυκτά εδάφη σε βάθος 0-30cm	90
Παράρτημα Γ2: Συντελεστές μεταβολής αποθέματος οργανικού άνθρακα (stock- change factors) για διαφορετικές πρακτικές διαχείρισης καλλιεργούμενων εκτάσεων	91
Παράρτημα Δ – Συνολική έκταση ελαιώνων	93

Κεφάλαιο 1^ο Εισαγωγή

Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής αποτελεί ένα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα του 21^{ου} αιώνα, επηρεάζοντας αρνητικά τη λειτουργία των οικοσυστημάτων, τη διατήρηση των φυσικών πόρων και της βιοποικιλότητας. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη σημασία έχει ο πρωτογενής τομέας, ο οποίος έχει διττό ρόλο. Από την μια πλευρά συμβάλλει στην αύξηση των εκπομπών, ενώ από την άλλη, αποτελεί μια δεξαμενή αποθήκευσης άνθρακα με την μορφή εδαφικού οργανικού άνθρακα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ της ατμόσφαιρας, του υπέργειου και υπόγειου τμήματος του εδάφους διαμορφώνει τον κύκλο του άνθρακα, επηρεάζοντας τόσο τις εκπομπές όσο και τη δέσμευση αερίων του θερμοκηπίου.

1.1 Το πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και ο ρόλος της γεωργίας

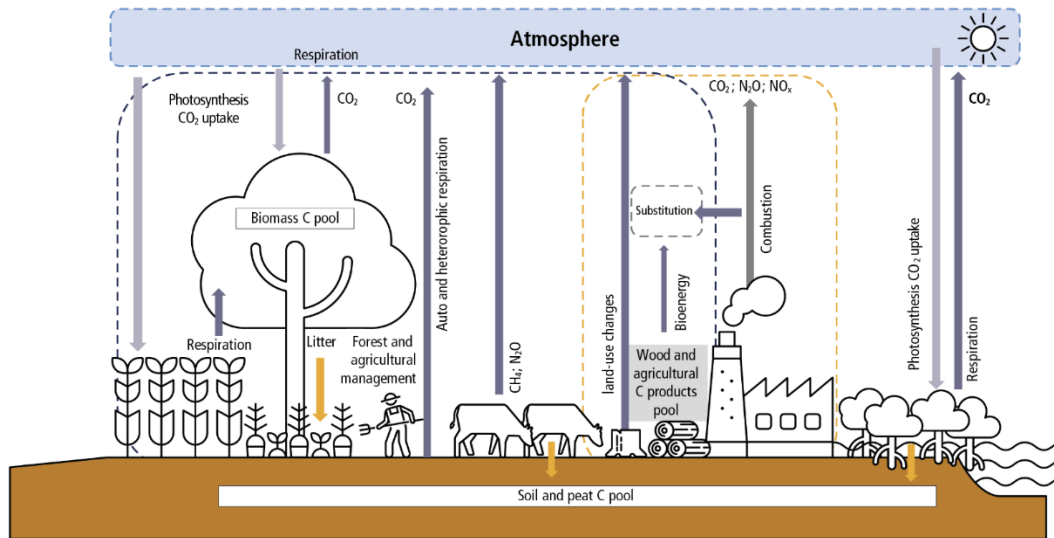
Όλα τα οικοσυστήματα ¹του πλανήτη έχουν ήδη επηρεαστεί με επιπτώσεις οι οποίες ακόμα παραμένουν σε μεγάλο βαθμό απροσδιόριστες (Parry et al., 2007). Η κλιματική αλλαγή είναι αποτέλεσμα κυρίως της αυξημένης συγκέντρωσης ορισμένων αερίων στην ατμόσφαιρα, παγιδεύοντας την εξερχόμενη θερμότητα της Γης και ενισχύοντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα τέσσερα βασικά αέρια είναι το μεθάνιο (CH₄), το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) και τα φθοριούχα αέρια.

Η αυξημένη συγκέντρωση των αερίων αυτών εντείνει το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, και κατ' επέκταση έχει άμεσες συνέπειες στο γεωργικό τομέα, τη βιοποικιλότητα και την παγκόσμια επισιτιστική ασφάλεια (Parry et al., 2007; IPCC, 2022).

Σε αντίθεση με άλλους παραγωγικούς τομείς, στον τομέα της γεωργίας, δασοπονίας και άλλων χρήσεων γης (AFOLU) ²υπάρχει αμφίρροπη ροή. Συγκεκριμένα, από τη μια πλευρά ο τομέας αυτός συνδέεται με το ένα τέταρτο περίπου των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ενώ από την άλλη μπορεί να δεσμεύσει εκπομπές CO₂ από την ατμόσφαιρα μέσω φυσικών διεργασιών, συμβάλλοντας στον περιορισμό του προβλήματος (Σχήμα 1). Ο τομέας αυτός διαφοροποιείται από τους υπόλοιπους, καθώς δεν εξαρτάται άμεσα από τα ορυκτά καύσιμα, γεγονός που αναδεικνύεται κρίσιμο για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

¹ Οικοσύστημα: ορίζεται κάθε σύστημα βιοτικών (έμβιων όντων) και μη-βιοτικών (άβια ύλη και διάφορους φυσικούς παράγοντες όπως ηλιοφάνεια, θερμοκρασία, κ.α.) παραγόντων μιας περιοχής και οι σχέσεις μεταξύ τους.

² Agriculture, Forestry and Other Land Use - AFOLU



Σχήμα 1. Ροές αερίων του θερμοκηπίου και μεταβολές άνθρακα στις δεξαμενές άνθρακα.
Πηγή: Climate Change, IPCC A6 report

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται όλο και μεγαλύτερο αρνητικό ισοζύγιο, καθώς η ικανότητα αντιστάθμισης δεν επαρκεί για να καλύψει τη συνεχή αύξηση των εκπομπών. Σύμφωνα με την εκτίμηση των Alexandratos & Bruinsma (2012), η αγροτική παραγωγή θα χρειαστεί να αυξηθεί κατά 60% σε σχέση με το 2005 προκειμένου να καλυφθεί η ζήτηση σε τρόφιμα. Δεδομένων των μεταβαλλόμενων συνθηκών που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή, η δυνατότητα της γεωργικής παραγωγής να ανταποκριθεί στην αυξημένη ζήτηση, τίθεται σε αμφισβήτηση (Lobell et al., 2011). Συγκεκριμένα, η μεταβολή της θερμοκρασίας επηρεάζει άμεσα τα επίπεδα βροχόπτωσης, δηλαδή την συχνότητα και την ένταση τους, καθώς και την εμφάνιση συχνότερων ακραίων καιρικών φαινομένων. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται η παραγωγικότητα και η απόδοση των γεωργικών εκμεταλλεύσεων, απειλώντας την επισιτιστική ασφάλεια και τη βιωσιμότητα των αγροτικών οικοσυστημάτων (Prajapati et al., 2024). Παράλληλα, η εντατική χρήση χημικών εισροών και η υποβάθμιση της ποιότητας των τροφίμων θέτουν σε κίνδυνο την ανθρώπινη υγεία και ποιότητα ζωής. Μια ακόμη επίπτωση της κλιματικής αλλαγής αποτελεί η ραγδαία ανάπτυξη των παθογόνων οργανισμών και εντόμων που ευνοούνται από τις μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, διαταράσσοντας την ισορροπία του οικοσυστήματος (Bebber, 2013).

Στο πλαίσιο αντιμετώπισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αυξανόμενης αμφισβήτησης των σταδίων της αλυσίδας τροφίμων, έχει εδραιωθεί το ενδιαφέρον για την αναγεννητική γεωργία. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι ο όρος αυτός συνδέεται με ένα σύνολο αρχών και πρακτικών που βασίζονται στη λειτουργία των φυσικών διεργασιών του

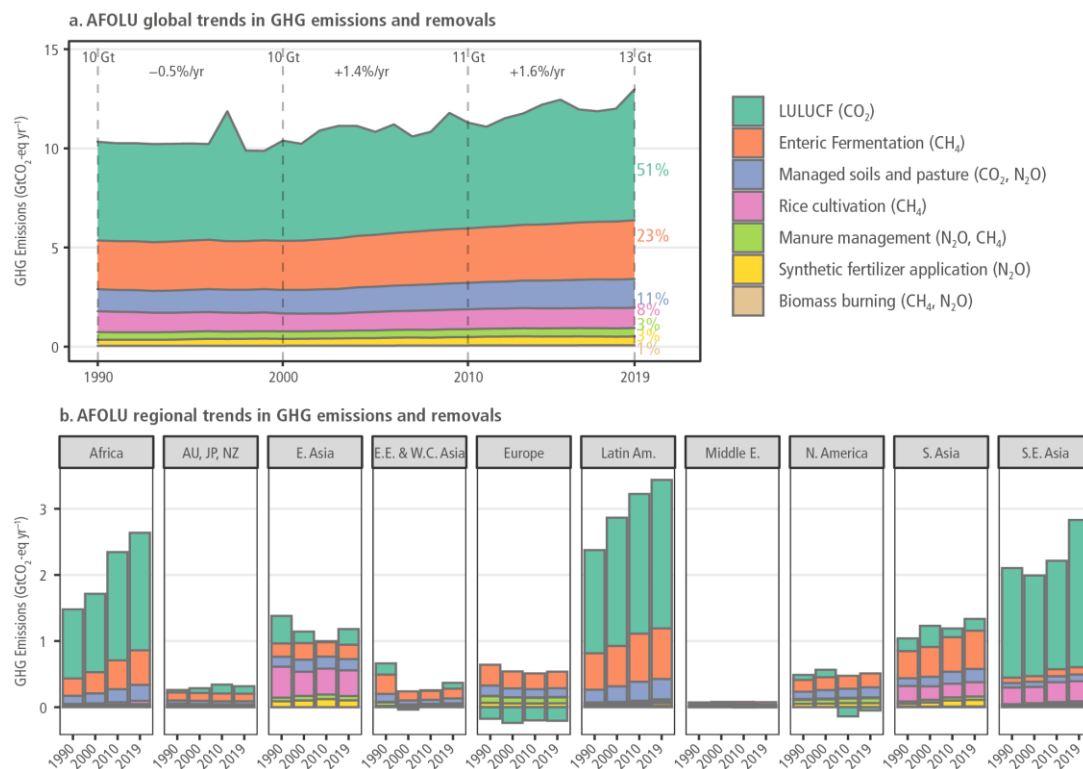
αγροοικοσυστήματος, όπως η φωτοσύνθεση και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οργανισμών του εδάφους.

1.2 Η γεωργία ως εργαλείο μετριασμού και προσαρμογής στη κλιματική αλλαγή

Η συμβολή της γεωργίας στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής εκτείνεται σε δύο αλληλένδετα επίπεδα. Πρώτον, στον μετριασμό, όπου σχετίζεται κυρίως με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και με την αύξηση της δέσμευσης του άνθρακα στα αγροτικά οικοσυστήματα, ιδιαίτερα στο έδαφος. Δεύτερον, στην προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες, η οποία ενισχύει την ανθεκτικότητα σε ακραία κλιματικά φαινόμενα, όπως η ξηρασία, η υποβάθμιση των εδαφικών πόρων και η θερμική καταπόνηση. Ο βασικός μηχανισμός επίτευξης και των δύο αυτών στόχων είναι η διατήρηση της δομικής ακεραιότητας του εδάφους, μέσα από τις εφαρμοζόμενες πρακτικές. Επομένως, οι πρακτικές αυτές δεν θα πρέπει να παρεμποδίζουν τις βασικές λειτουργίες του εδάφους - φυσικές, χημικές και βιολογικές - προκειμένου να επιτευχθεί η μετατροπή της γεωργίας από πηγή εκπομπών, σε ενεργή δεξαμενή δέσμευσης άνθρακα. Στο πλαίσιο αυτό, οι αλλαγές διαχείρισης στοχεύουν στη σταδιακή αύξηση της οργανικής ύλης του εδάφους, ώστε να πλησιάσει τα προκαλλιεργητικά της επίπεδα. Οι αλλαγές αυτές μπορούν να ενισχύσουν αισθητά τις προσπάθειες της κοινωνίας να ανασχέσουν την άνοδο του ατμοσφαιρικού CO₂ και ταυτόχρονα να βελτιώσουν την ποιότητα του εδάφους και την παραγωγικότητά του. Σύμφωνα με τους Brady & Weil (2017), κάποιες εκτιμήσεις υποστηρίζουν ότι, μέσα σε μια 50ετία, αυτή η διαδικασία θα μπορούσε να καλύψει περίπου το 15% της συνολικής μείωσης CO₂.

Σύμφωνα με το Σχήμα 2, ο οργανισμός Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) παρουσίασε ότι μέχρι το 2019 οι καθαρές εκπομπές των τομέων της Γεωργίας, Δασοκομίας και άλλων χρήσεων γης (Agriculture, Forestry and Other Land Use – AFOLU) έχουν αυξηθεί κατά 3 Gt CO_{2eq} σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, σε παγκόσμιο επίπεδο. Για το έτος 2019, οι εκτιμήσεις των εκπομπών κυμαίνονται γύρω στα 13 Gt CO_{2eq}, εκ των οποίων το μισό των εκπομπών αυτών αποδίδεται στην Αλλαγή Χρήσης Γης και στη Δασοπονία (LULUCF), έπειτα ακολουθεί η εντερική ζύμωση με ποσοστό 23% και τρίτο, τα διαχειριζόμενα γεωργικά εδάφη με ποσοστό 11%. Σε επίπεδο γεωγραφικής ανάλυσης, η εικόνα παρουσιάζει τη χωρική κατανομή των εκπομπών. Αναλυτικότερα, παρατηρούνται έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ περιοχών, καθώς η Λατινική Αμερική και η Νοτιοανατολική Ασία αντιπροσωπεύουν τα

υψηλότερα ποσοστά εκπομπών LULUCF³, ενώ η Ευρώπη έχει καταφέρει να μετατρέψει αυτόν τον τομέα σε καθαρή δεξαμενή άνθρακα.



Σχήμα 2. Παγκόσμιες (a) και περιφερειακές (b) τάσεις εκπομπών και απορροφήσεων αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα AFOLU.

Πηγή: IPCC A6 report

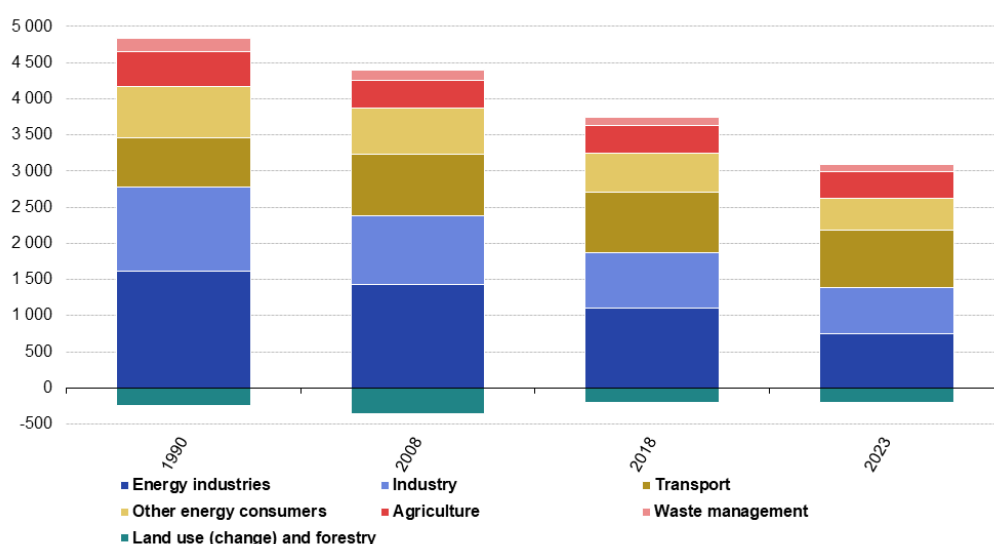
Τα περισσότερα κράτη μέλη της ΕΕ έχουν καταφέρει να υπερκαλύψουν τις εκπομπές που προκύπτουν από τα χημικά λιπάσματα, την παραγωγική διαδικασία ή τη μετατροπή εκτάσεων σε καλλιεργήσιμη γη, μέσα από τις απορροφήσεις άνθρακα μέσω των δασικών και γεωργικών οικοσυστημάτων.

Ωστόσο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, μέχρι το 2008 το δυναμικό δέσμευσης ήταν αρκετά υψηλό για την ΕΕ, και από εκεί και πέρα παρατηρείται μια σταδιακή μείωση. Συγκεκριμένα, την περίοδο 2008-2023 οι καθαρές απομακρύνσεις ή απορροφήσεις εκπομπών από τον τομέα LULUCF μειώθηκαν κατά 44,5% στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η μείωση αποδίδεται σε λιγότερες αναδασώσεις και στην αύξηση της υλοτομικής δραστηριότητας. Παρά τη μείωση αυτή, οι καθαρές απορροφήσεις εξακολουθούσαν να αντισταθμίζουν περισσότερο από το 6% των

³ Land use, land use change and forestry (LULUCF)

συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2023, αντιστοιχώντας σε 198,4 εκατομμύρια τόνους ισοδυνάμου CO₂ (Mt CO₂eq). Το επίπεδο αυτό παραμένει σημαντικά χαμηλότερο από τον στόχο της ΕΕ για καθαρές απορροφήσεις τουλάχιστον 310 εκατομμυρίων τόνων ισοδυνάμου CO₂ έως το 2030 (Eurostat).

Συνοπτικά, η αναγνώριση της κλιματικής αλλαγής και των επιπτώσεων της από την Ευρωπαϊκή Ένωση αποτυπώνεται στα αποτελέσματα των δράσεών της. Παράλληλα, επιβεβαιώνεται η σημασία της γεωργίας ως ένα εργαλείο μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, καθώς οι εκπομπές του τομέα AFOLU συνδέονται άρρηκτα με τις διαχειριστικές πρακτικές στη γεωργία.



Σχήμα 3. Εκπομπές και απορροφήσεις αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (1990-2023) (εκατομμύρια τόνοι ισοδυνάμου CO₂)

Πηγή: Eurostat

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει σημειωθεί στην αναγνώριση της σημασίας των γεωργικών οικοσυστημάτων στον κύκλο του άνθρακα και κατ' επέκταση στην κλιματική κρίση, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικά κενά γνώσης σχετικά με το δυναμικό δέσμευσης οργανικού άνθρακα σε συγκεκριμένα καλλιεργητικά συστήματα της Μεσογείου. Ιδιαίτερα στους ελαιώνες, οι οποίοι αποτελούν ένα από τα κύρια αγροτικά συστήματα στη μεσογειακή ζώνη, οι ποσοτικές εκτιμήσεις της δέσμευσης εδαφικού οργανικού άνθρακα υπό διαφορετικά σενάρια διαχείρισης παραμένουν περιορισμένες. Παράλληλα, η αξιολόγηση των επιπτώσεων των αναγεννητικών πρακτικών διαχείρισης παραμένει κεντρικό ερευνητικό ζήτημα, καθώς

μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τόσο τις εκπομπές όσο και τη δέσμευση άνθρακα στα αγροτικά οικοσυστήματα.

Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ένταξη των γεωργικών πρακτικών δέσμευσης άνθρακα σε μηχανισμούς χρηματοδότησης που σχετίζονται με τις εθελοντικές αγορές άνθρακα (Voluntary Carbon Markets), μέσω της ανάπτυξης γεωργικών έργων δέσμευσης άνθρακα (carbon projects). Σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες έχουν ήδη αναπτυχθεί πρωτοβουλίες που επιτρέπουν τη δημιουργία πιστοποιημένων μονάδων μείωσης εκπομπών μέσω της εφαρμογής πρακτικών διαχείρισης που συμβάλλουν στην αύξηση του εδαφικού οργανικού άνθρακα. Ωστόσο, στην Ελλάδα η ανάπτυξη τέτοιων πρωτοβουλιών βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο, ενώ οι ποσοτικές εκτιμήσεις του δυναμικού δέσμευσης άνθρακα σε γεωργικά συστήματα που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη τέτοιων έργων παραμένουν περιορισμένες.

Στο πλαίσιο αυτό, καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική η διερεύνηση της δυναμικής δέσμευσης οργανικού άνθρακα σε γεωργικά οικοσυστήματα της Ελλάδας και ειδικότερα σε ελαιώνες. Η ποσοτικοποίηση αυτή μπορεί να συμβάλει τόσο στην κατανόηση της περιβαλλοντικής συμβολής των γεωργικών πρακτικών όσο και στη διερεύνηση των δυνατοτήτων σύνδεσης της γεωργίας με αναδυόμενους μηχανισμούς της αγοράς άνθρακα.

1.3 Σκοπός και στόχοι της παρούσας διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της συμβολής των αναγεννητικών πρακτικών διαχείρισης του εδάφους στη δέσμευση οργανικού άνθρακα σε αγροτικά οικοσυστήματα, με έμφαση στις δενδρώδεις καλλιέργειες στη μεσογειακή ζώνη. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται η δυναμική μεταβολής του αποθέματος οργανικού άνθρακα του εδάφους (Soil Organic Carbon – SOC) υπό δύο διαφορετικά σενάρια διαχείρισης. Το ένα αφορά τη συμβατική διαχείριση του ελαιώνα, ενώ το δεύτερο την αναγεννητική. Για την ποσοτικοποίηση της διαφοράς στον οργανικό άνθρακα στο κάθε ένα σενάριο, εφαρμόζεται η μεθοδολογία των κατευθυντήριων οδηγιών του IPCC, αξιοποιώντας τυποποιημένους συντελεστές μεταβολής σύμφωνα με την προσέγγιση Tier 1.

Η διερεύνηση του δυναμικού δέσμευσης άνθρακα στα γεωργικά εδάφη αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της εθελοντικής αγοράς άνθρακα (Voluntary Carbon Markets – VCM), όπου ο θετικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος μπορεί να μεταφραστεί σε πιστωτικές μονάδες μείωσης εκπομπών (carbon credits) ή μονάδες άνθρακα. Με βάση τα παραπάνω, η εργασία επιδιώκει να αποτιμήσει το δυναμικό των αναγεννητικών πρακτικών διαχείρισης ως εργαλείου

ενίσχυσης της δέσμευσης άνθρακα στο έδαφος και να συνδέσει τη γεωργία με την εθελοντική αγορά άνθρακα στην Ελλάδα.

Κεφάλαιο 2^ο Αναγεννητική Γεωργία

Η αναγεννητική γεωργία αποτελεί μια εναλλακτική προσέγγιση διαχείρισης και αξιοποίησης των αγροτικών οικοσυστημάτων, σε αντιδιαστολή με τις υπάρχουσες συμβατικές πρακτικές. Αναπτύχθηκε με σκοπό την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών, κοινωνικών καθώς και οικονομικών προκλήσεων. Η διαφοροποίησή της από άλλες πρακτικές έγκειται στο γεγονός ότι δεν περιορίζεται στη διατήρηση μόνο των φυσικών πόρων, αλλά στοχεύει στην ολιστική αποκατάσταση των οικοσυστημάτων, επιδιώκοντας τη μακροχρόνια σταθερότητά τους (Schreefel et al., 2020; White, 2020).

2.1 Ορισμός της Αναγεννητικής Γεωργίας

Ο Robert Rodale το 1980 εισήγαγε για πρώτη φορά την έννοια της αναγεννητικής βιολογικής γεωργίας, σύμφωνα με τον ορισμό που έδωσε, όπου αποτελεί μια ολιστική προσέγγιση που δίνει σημασία σε τρεις πυλώνες, στο περιβάλλον, στην κοινωνία και στην οικονομία. Η ιδέα βασίζεται στην αρμονική σχέση μεταξύ των ζώων, των αγροτών και της καλλιεργούμενης γης, με έμφαση στην υγεία του εδάφους (Rodale Institute).

Μια άλλη προσπάθεια διατύπωσης του ορισμού πραγματοποιήθηκε από τη Regeneration International το 2017, σύμφωνα με το οποίο η αναγεννητική γεωργία περιλαμβάνει τόσο πρακτικές που σχετίζονται με την καλλιέργεια, όσο και πρακτικές που ενσωματώνουν τα κτηνοτροφικά ζώα. Ο συνδυασμός των παραπάνω επιφέρει θετικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα, συμβάλλοντας στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής με έναν εναλλακτικό τρόπο, δηλαδή τη βελτίωση της οργανικής ουσίας και της βιοποικιλότητας του εδάφους (Regeneration International, 2017).

Λίγα χρόνια αργότερα, οι Schreefel et al. (2020) προχώρησαν στην εννοιολογική ανασκόπηση του ορισμού που είχε δοθεί από τον Rodale, αναδεικνύοντας τον πολυδιάστατο χαρακτήρα της αναγεννητικής γεωργίας (Schreefel et al., 2020).

Το 2021, οι Giller et al. προτείνουν έναν ορισμό για την αναγεννητική γεωργία με μια πιο αγρονομική προσέγγιση σε σύγκριση με τις προηγούμενες ερμηνείες. Συγκεκριμένα, η υιοθέτηση των αναγεννητικών πρακτικών μπορεί να ερμηνευθεί ως μια προσπάθεια παραγωγικής ανάπτυξης μέσα σε ένα πλαίσιο παγκόσμιας γεωργικής εντατικοποίησης, με παράλληλη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ φυτών και μικροοργανισμών στο αγροτικό περιβάλλον (Giller et al., 2021).

Στο ίδιο πλαίσιο ερμήνευσαν τον όρο της αναγεννητικής γεωργίας και οι Khangura et al., το 2023, με τη διαφορά ότι εστίασαν στην οπτική της βιωσιμότητας. Στη προσέγγιση αυτή, ο

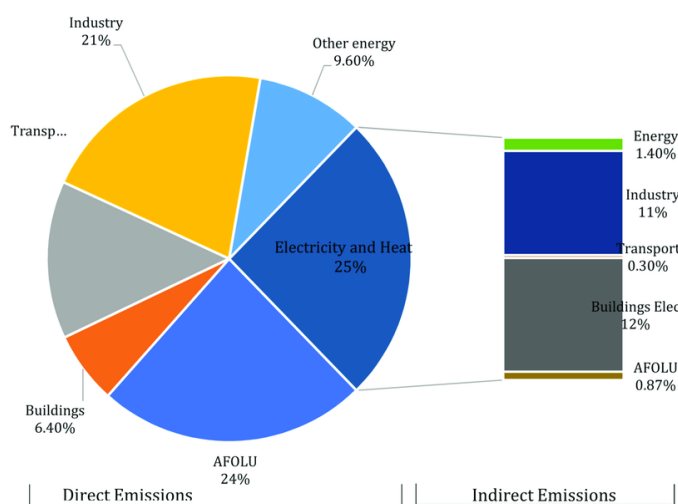
στόχος επικεντρώνεται στη βελτίωση της γονιμότητας του εδάφους, στην προστασία και αύξηση της βιοποικιλότητας και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των συστημάτων σε μακροχρόνιο ορίζοντα (Khangura et al., 2023).

Συμπερασματικά, παρότι δεν έχει διατυπωθεί ένας ενιαίος ορισμός της έννοιας, όλες οι προσεγγίσεις που έχουν δημοσιευθεί συγκλίνουν σε ένα κοινό εννοιολογικό πλαίσιο, το οποίο διαμορφώνει τη φιλοσοφία της αναγεννητικής γεωργίας (Kelly, 2020).

2.2. Προκλήσεις της αναγεννητικής γεωργίας

Οι βασικές προκλήσεις της αναγεννητικής γεωργίας αφορούν, αφενός, την αποκατάσταση της γονιμότητας των εδαφών δεσμεύοντας άνθρακα από την ατμόσφαιρα και, αφετέρου, την προστασία και την ενίσχυση της βιοποικιλότητας.

Η πρώτη πρόκληση επικεντρώνεται στο γεγονός ότι η γεωργία οφείλεται για το ένα τέταρτο των εκπομπών (IPCC, 2019)(Σχήμα 4), κυρίως λόγω της εντατικοποίησης της γεωργικής παραγωγής, η οποία προάγει την απλοποίηση των εδαφικών οικοσυστημάτων, οδηγώντας σε μείωση της βιοποικιλότητας και υποβάθμιση της μακροχρόνιας γονιμότητας του εδάφους. Καθώς οι πρακτικές αυτές επικρατούν, επέρχεται σταδιακή μείωση των αποθεμάτων εδαφικού οργανικού άνθρακα και αποδυναμώνεται η ικανότητα του εδάφους να δεσμεύει άνθρακα από την ατμόσφαιρα.



Σχήμα 4. Κατανομή των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα δραστηριότητας.

Πηγή: IPCC – Fifth Assessment Report (AR5), 2014

Όσον αφορά τη δεύτερη πρόκληση, η απώλεια της βιοποικιλότητας στα γεωργικά οικοσυστήματα αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, το οποίο προκύπτει κυρίως ως αποτέλεσμα της εκτεταμένης μονοκαλλιέργειας. Η μείωση της γενετικής ποικιλότητας αυξάνει την ευαλωτότητα των συστημάτων σε ασθένειες και παράσιτα, ενώ παράλληλα μειώνει την οικολογική σταθερότητα. Από το 1900, σχεδόν το 70% της ποικιλίας των καλλιεργειών σταμάτησε να καλλιεργείται από τους παραγωγούς (ΕΛΣΤΑΤ, 2025). Το ζήτημα αυτό εντείνεται από πρόσθετους παράγοντες που σχετίζονται με τον περιορισμό των φυσικών οικοτόπων, την επέκταση των γεωργικών εδαφών καθώς και με την πληθυσμιακή αύξηση. Όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν άμεσα και έμμεσα τη δομή και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων, θέτοντας σε κίνδυνο ολόένα και μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας βιοποικιλότητας. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την επανεξέταση των κυρίαρχων μοντέλων γεωργικής παραγωγής (Giller et al., 2021).

2.3 Επιδιώξεις και αρχές της αναγεννητικής γεωργίας

Σε αντίθεση με άλλες μορφές βιώσιμης γεωργίας, η προσέγγιση αυτή είναι πρόσθετη. Δηλαδή, στοχεύει στην αποκατάσταση της λειτουργικής ροής των αγροοικοσυστημάτων, χωρίς να περιορίζεται στην καταπολέμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ή τη διατήρηση φυσικών οικοτόπων.

Η αναγεννητική γεωργία επιδιώκει την αποκατάσταση των λειτουργικών ιδιοτήτων των αγροοικοσυστημάτων (Schreefel et al., 2020). Οι βασικές επιδιώξεις της επικεντρώνονται στην ανάκαμψη της αυτοορρυθμιστικής ικανότητας του εδάφους, στη σταθεροποίηση του κύκλου των θρεπτικών στοιχείων και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, είτε στο περιβάλλον είτε στις διαχειριστικές πρακτικές.

Το πλαίσιο της αναγεννητικής γεωργίας βασίζεται στους φυσικούς και βιολογικούς μηχανισμούς του εδάφους, στοχεύοντας στην εγκαθίδρυση μιας σταθερής και διαρκούς ανθεκτικότητας και λειτουργικότητας των γεωργικών συστημάτων σε μακροχρόνια βάση. Συγκεκριμένα, το μοντέλο της αναγεννητικής γεωργίας περιλαμβάνει πέντε αρχές που συνοδεύονται από επιμέρους διαχειριστικές πρακτικές.

Χαρακτηριστικό των αναγεννητικών αρχών είναι ότι λειτουργούν ως αλληλοεξαρτόμενα στοιχεία, και όχι μεμονωμένα. Η επιτυχής εφαρμογή τους καθιστά εφικτή τη σταθερή λειτουργία των οικοσυστημάτων και την ενίσχυση της βιοποικιλότητας. Οι πέντε βασικές αρχές σε δενδρώδη αγροτικά συστήματα είναι η μείωση της διατάραξης του εδάφους, η διατήρηση συνεχούς φυτικής κάλυψης, η παρουσία ενεργών ριζικών συστημάτων, η προώθηση

της βιοποικιλότητας και η ενσωμάτωση της ζωικής παραγωγής στα αγροτικά συστήματα (Σχήμα 5; Khangura et al., 2023).

Ωστόσο, η διάχυση και υιοθέτηση των αρχών που προσβέβει η αναγεννητική γεωργία αντιμετωπίζει ορισμένα εμπόδια, πέρα από τα τεχνικά ζητήματα. Τα επιπρόσθετα εμπόδια αφορούν το οικονομικό και θεσμικό πλαίσιο μέσα στο οποίο εντάσσεται ο παραγωγός. Η παροχή κατάλληλων οικονομικών κινήτρων αναγνωρίζεται ως κρίσιμος παράγοντας για τη διευκόλυνση της μετάβασης προς αναγεννητικά συστήματα, καθώς μπορεί να μειώσει το ρίσκο της αλλαγής και να ενθαρρύνει επενδύσεις σε πρακτικές των οποίων τα οφέλη εκδηλώνονται κυρίως σε μέσο- και μακροπρόθεσμο ορίζοντα (Schreefel et al., 2020). Συμπερασματικά, οι αρχές που συνοδεύουν την αναγεννητική γεωργία ορίζουν τις κατευθυντήριες γραμμές που πρέπει να ακολουθήσουν οι πρακτικές διαχείρισης.



Σχήμα 5. Οι πέντε θεμελιώδεις αρχές της αναγεννητικής γεωργίας και η μεταξύ τους αλληλοεξαρτόμενη σχέση.

Πηγή: Προσαρμογή από Khangura et al., 2023

2.4 Ιστορική εξέλιξη

Στις αρχές του 1980, οι ερευνητές Gable και Sampson, επιχείρησαν να ερμηνεύσουν τις αρνητικές επιπτώσεις της εντατικής και χημικά εξαρτημένης γεωργίας στο περιβάλλον και

στους φυσικούς πόρους, κρίνοντας αναγκαία τη στροφή σε εναλλακτικές πρακτικές (Sampson, 1982).

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1983, ο Robert Rodale διατύπωσε έναν γενικό όρο «αναγεννητική γεωργία» και θεωρείται από τους πρώτους που έδωσαν μια θεωρητική μορφή στην έννοια. Υποστήριξε ότι ένα αποτελεσματικό αγροτικό μοντέλο, παράλληλα με την αύξηση της παραγωγικότητας ως βασικού στόχου, οφείλει να ενισχύει και τη μακροχρόνια οικολογική και οικονομική σταθερότητα των αγροτικών εκμεταλλεύσεων (Rodale, 1983; Giller et al., 2021).

Στη συνέχεια, ο όρος «αναγεννητική γεωργία» πλαισιώθηκε από τέσσερις βασικούς πυλώνες, όπως αναδείχθηκαν από ερευνητές του Rodale Institute και τον Francis et al. (1986). Συγκεκριμένα, επισημάνθηκε η σημασία της διατήρησης της γονιμότητας του εδάφους, της ολοκληρωμένης φυτοπροστασίας, της βελτίωσης των φυτικών ποικιλιών και της ενσωμάτωσης φυτικής και ζωικής παραγωγής στο ίδιο σύστημα (Francis et al., 1986).

Σε μεταγενέστερη περίοδο, το 2010, παρατηρήθηκε σχετική κάμψη στη δημοσίευση επιστημονικών άρθρων και στην εφαρμογή αναγεννητικών πρακτικών. Από τότε, το ενδιαφέρον για την αναγεννητική γεωργία αυξήθηκε ραγδαία σε παγκόσμιο επίπεδο, καθώς συνδέθηκε με την ανάγκη αντιμετώπισης των ολοένα και εντονότερων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Κεντρικό ρόλο διαδραμάτισαν, αυτή την φορά, οι ίδιοι οι αγρότες και όχι οι ερευνητές, οι οποίοι εφάρμοζαν πιλοτικά πρακτικές όπως η μειωμένη άροση, η διατήρηση της φυτικής κάλυψης στα καλλιεργούμενα εδάφη και η ενσωμάτωση των κτηνοτροφικών ζώων. Έπειτα αξιολογούσαν τα αποτελέσματα και τα κοινοποιούσαν μέσω οργανώσεων και δικτύων (O'Donoghue et al., 2022; White, 2020).

2.5 Η αναγεννητική γεωργία στο πλαίσιο της κλιματικής πολιτικής

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, τα τελευταία χρόνια δίνεται ολοένα και μεγαλύτερη προσοχή στην έννοια της αναγεννητικής γεωργίας, αν και δεν έχει ακόμη θεσμοθετηθεί σε επίπεδο ευρωπαϊκής πολιτικής. Ωστόσο, αρκετοί από τους στόχους που εντάσσονται στο πλαίσιο της αναγεννητικής γεωργίας συγκλίνουν με τους στόχους της νέας Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (ΚΑΠ 2023-2027). Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται η προστασία και αποκατάσταση της υγείας του εδάφους, η ενίσχυση της βιοποικιλότητας και η συμβολή στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

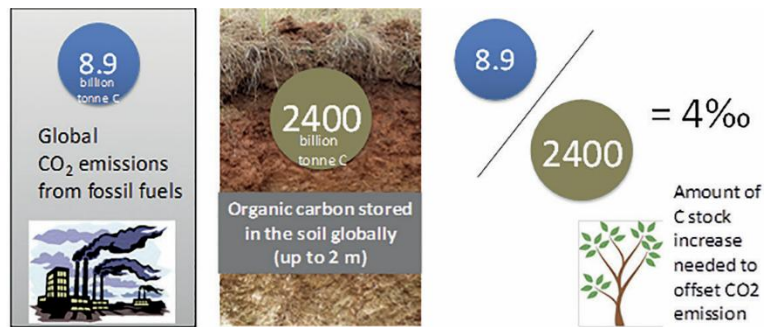
Παράλληλα, μέσω του EU CAP Network την περίοδο 2023-2024, είκοσι ερευνητές ανέδειξαν τα οφέλη και τις προκλήσεις της αναγεννητικής γεωργίας. Ωστόσο, η ευρύτερη αποδοχή και ενσωμάτωσή της στη γεωργική πολιτική και πρακτική προϋποθέτει τη στήριξη

της σε μετρήσιμες βελτιώσεις της εδαφικής γονιμότητας και της ανθεκτικότητας των αγροοικοσυστημάτων. Γι' αυτό προτάθηκαν δύο καινοτόμες ιδέες, η μία αφορά τη δημιουργία ερευνητικών ομάδων προκειμένου να αναδείξουν ποιος συνδυασμός πρακτικών επιφέρει σημαντικότερα αποτελέσματα και η άλλη, την ανάπτυξη μηχανισμών και εργαλείων παρακολούθησης της υγείας του εδάφους, προκειμένου να ληφθούν ανάλογες δράσεις.

Η κατεύθυνση αυτή ενισχύεται περαιτέρω από τη γνωμοδότηση πρωτοβουλίας της Ευρωπαϊκής Οικονομικής και Κοινωνικής Επιτροπής (2025), η οποία αναγνωρίζει επίσημα την αναγεννητική γεωργία ως στρατηγικό εργαλείο για τη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων και την επίτευξη των στόχων για το κλίμα και τη βιοποικιλότητα. Η γνωμοδότηση προτείνει έναν κοινό ορισμό της αναγεννητικής γεωργίας σε ευρωπαϊκό επίπεδο, βασισμένο σε αποτελέσματα και δείκτες επιδόσεων, και καλεί για την ευθυγράμμιση του κανονιστικού πλαισίου και των χρηματοδοτικών εργαλείων της ΚΑΠ με τις επιδόσεις στη διαχείριση του εδάφους και των οικοσυστημάτων. Ενόψει των συζητήσεων για την ΚΑΠ μετά το 2027, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων παρακολούθησης και καταγραφής (European Economic and Social Committee, 2025).

Σε διεθνές επίπεδο, αναγνωρίζεται η σημασία της μετατροπής της γεωργίας από πηγή εκπομπών σε δεξαμενή άνθρακα. Συγκεκριμένα, στη Διάσκεψη του Παρισιού το 2015, παρουσιάστηκε η πρωτοβουλία «4 ανά 1000», η οποία στοχεύει στην ετήσια αύξηση των αποθεμάτων εδαφικού άνθρακα κατά 4% ανά έτος. Σκοπός της πρωτοβουλίας είναι η συμβολή της γεωργίας στη δέσμευση άνθρακα στο έδαφος, αναδεικνύοντας τον αγροτικό τομέα ως μοχλό μετριασμού της κλιματικής αλλαγής (UNFCCC, 2015). Το θεωρητικό πλαίσιο γύρω από την πρωτοβουλία «4 ανά 1000» προκύπτει από τη σύγκριση των ετήσιων εκπομπών άνθρακα από ορυκτά καύσιμα παγκοσμίως (8,9 δισεκατομμύρια τόνοι άνθρακα) με τα συνολικά εκτιμώμενα αποθέματα οργανικού άνθρακα που είναι αποθηκευμένα στα εδάφη παγκοσμίως (2,4 τρισεκατομμύρια τόνοι άνθρακα) (Σχήμα 6).

Η λογική της πρωτοβουλίας βασίζεται στο γεγονός ότι τα εδάφη αποτελούν τη μεγαλύτερη χερσαία δεξαμενή άνθρακα. Ενδεικτικά, τα ανώτερα δύο μέτρα του εδαφικού προφίλ περιέχουν συνολικά περίπου 2.400 δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα, ενώ οι ετήσιες ανθρωπογενείς εκπομπές αντιστοιχούν σε ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτού του αποθέματος. Η αναλογική διαφορά μεταξύ τους αποτέλεσε τη θεωρητική βάση του στόχου «4 ανά 1000», δίνοντας έμφαση στη σταδιακή αύξηση του εδαφικού άνθρακα, η οποία μπορεί να έχει θετικά δυσανάλογα μεγάλο αποτέλεσμα σε παγκόσμια κλίμακα (Minasny et al., 2017).



Σχήμα 6. Σχέση παγκόσμιων εκπομπών CO₂ και δυναμικού αύξησης του εδαφικού οργανικού άνθρακα (πρωτοβουλία 4‰).
Πηγή: Minasny et al. (2017).

Το δυναμικό δέσμευσης άνθρακα ανά εκτάριο και ανά έτος παρουσιάζει σημαντική χωρική μεταβλητότητα, όπως δείχνουν τα σύγχρονα εργαλεία ψηφιακής χαρτογράφησης. Οι χαμηλές τιμές συνδέονται με συστήματα όπου επικρατεί η εντατικοποίηση, εμποδίζοντας την ικανότητα δέσμευσης, ενώ υψηλότερες τιμές αποτυπώνονται σε λιγότερα διαταραγμένα οικοσυστήματα, όπως λιβάδια, δάση, κ.λπ. (Six et al., 2002).

2.6 Σύνδεση αναγεννητικών πρακτικών με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs)

Η αναγεννητική γεωργία αποτελεί μια ολιστική, διαχειριστική προσέγγιση των αγροοικοσυστημάτων, η οποία ευθυγραμμίζεται άμεσα με Βασικούς Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) της Ατζέντας 2030. Μέσω των Voluntary National Reviews (VNR) κάθε χώρα όπως και η Ελλάδα, υποβάλλει στον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών αναφορά για την πρόοδο της χώρας ως προς τους κοινωνικούς, περιβαλλοντικούς και οικονομικούς στόχους. Στο πλαίσιο αυτό, οι εναλλακτικές διαχειριστικές πρακτικές που ενισχύουν την ποιότητα του εδάφους και τη δέσμευση άνθρακα, μπορούν να συμπεριληφθούν εφόσον συνδέονται έμμεσα με τρεις στόχους βιώσιμης ανάπτυξης.

SDG 2: Βιώσιμη παραγωγή τροφίμων (Zero Hunger)

Η αναγεννητική γεωργία ενισχύει την αύξηση της αγροτικής παραγωγικότητας με βιώσιμο τρόπο, διατηρώντας ή βελτιώνοντας τη λειτουργικότητα του εδάφους, αυξάνοντας την περιεκτικότητα της οργανικής ουσίας στο έδαφος και υποστηρίζοντας την καλύτερη διαχείριση του νερού μέσα στο αγροοικοσύστημα. Η διαφοροποίησή της από άλλες πρακτικές εντοπίζεται στον περιορισμό των εξωτερικών εισροών, και κατ' επέκταση στην αξιοποίηση οργανικών λιπασμάτων που ενισχύουν τη μακροπρόθεσμη σταθερότητα των αποδόσεων. Ως αποτέλεσμα,

βελτιώνεται η ποιότητα των τελικών προϊόντων, αντιμετωπίζοντας το ζήτημα της επισιτιστικής ασφάλειας, κυρίως σε περιοχές που πλήττονται από κλιματικές ή και οικονομικές πιέσεις (United Nations, 2025a).

SDG 13: Μείωση εκπομπών και δέσμευση CO₂ (Climate Action)

Βασικός στόχος της αναγεννητικής γεωργίας είναι η συμβολή της στον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της προσαρμογής των διαχειριστικών πρακτικών, καθιστώντας εφικτή τη δέσμευση άνθρακα στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους και μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τη γεωργική δραστηριότητα. Η βελτίωση της υγείας του εδάφους που προκύπτει από την αυξημένη δέσμευση άνθρακα προσφέρει επιπρόθετα οφέλη, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα στα ακραία καιρικά φαινόμενα (IISD, 2018).

SDG 15: Προστασία εδαφών και βιοποικιλότητας (Life on Land)

Η προστασία και αποκατάσταση των χερσαίων οικοσυστημάτων αποτελεί βασικό στοιχείο της αναγεννητικής γεωργίας. Μέσω αυτής προάγεται η ολιστική διατήρηση των οικοσυστημάτων, αντιμετωπίζοντας τα φαινόμενα όπως η ερημοποίηση, η υποβάθμιση της γονιμότητας του εδάφους και η απώλεια βιοποικιλότητας. Πρακτικές όπως η πολυκαλλιέργεια, η αγροδοσοπονία, η διατήρηση της φυτικής κάλυψης κ.α., συμβάλλουν στη δημιουργία ευνοϊκών συνθηκών για την ανάπτυξη οργανισμών που είναι απαραίτητοι για τη σωστή λειτουργία των αγροοικοσυστημάτων (Bardgett et al., 2008).

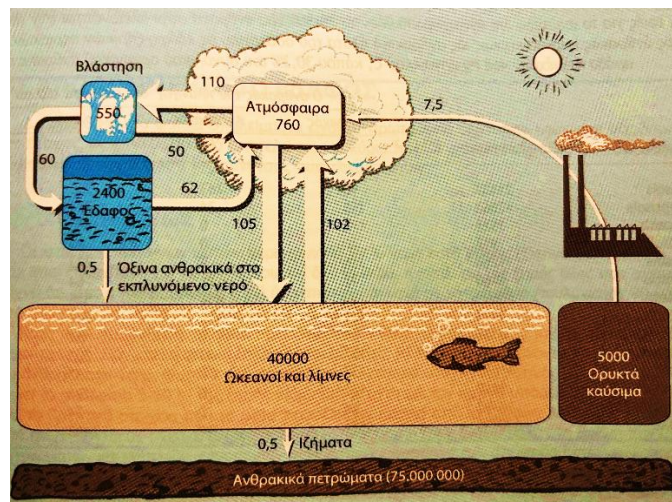
Συνολικά, η αναγεννητική γεωργία λειτουργεί ως συνδεδετικός κρίκος μεταξύ επισιτιστικής ασφάλειας, κλιματικής δράσης και προστασίας των χερσαίων οικοσυστημάτων, καθιστώντας την ένα κρίσιμο εργαλείο για την επίτευξη πολλών Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης με ολοκληρωμένο και μακροπρόθεσμα βιώσιμο τρόπο ανάπτυξης.

Κεφάλαιο 3ο Έδαφος, οργανικός άνθρακας και αναγεννητική διαχείριση

Ο οργανικός άνθρακας στο έδαφος επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργικότητα των εδαφικών διεργασιών και την ποιότητα του εδάφους. Το δυναμικό δέσμευσης και οι πρακτικές που θα εφαρμοστούν εξαρτώνται από τις εδαφικές και κλιματικές συνθήκες της περιοχής.

3.1 Εδαφική οργανική ύλη (SOM) και εδαφικός οργανικός άνθρακας (SOC)

Τα εδαφικά οικοσυστήματα λειτουργούν ως μία από τις πιο σημαντικές δεξαμενές άνθρακα στη βιόσφαιρα, με σχεδόν διπλάσιο άνθρακα από ό,τι η βλάστηση και η ατμόσφαιρα μαζί (Σχήμα 7). Επομένως, το αποτύπωμα της οποιασδήποτε μεταβολής στα αποθέματα οργανικού άνθρακα, επηρεάζει σημαντικά τον παγκόσμιο κύκλο του άνθρακα και το κλίμα (Lal et al., 2018).



Σχήμα 7. Απλουστευμένη αναπαράσταση του πλανητικού κύκλου άνθρακα, η οποία αναδεικνύει τις δεξαμενές άνθρακα που αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα. Οι αριθμοί στα πλαίσια εκφράζουν Pg άνθρακα αποθηκευμένου στις μείζονες δεξαμενές. Δεδομένα από τον IPCC (2007) και η εκτίμηση του εδαφικού άνθρακα από Batjes (1996).

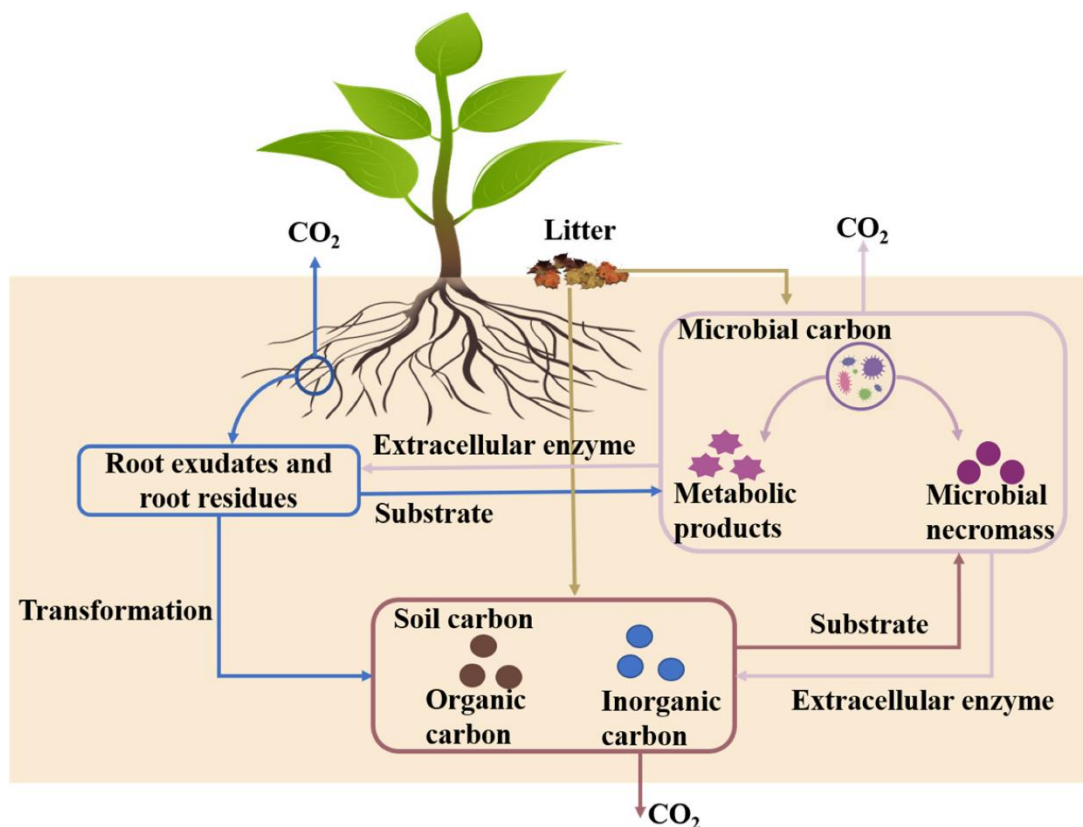
Πηγή: Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017).

Η παρουσία οργανικής ύλης στο έδαφος (Soil Organic Matter – SOM) διαδραματίζει κομβικό ρόλο στη λειτουργικότητα και την παραγωγική του ικανότητα, καθώς τόσο η ποιότητα όσο και η ποσότητα επηρεάζουν άμεσα τους δείκτες ποιότητας του εδάφους. Η οργανική ύλη του εδάφους είναι ένα σύνθετο μείγμα οργανικών ουσιών. Παραδείγματα τέτοιων είναι τα

φυτικά υπολείμματα, οι ρίζες φυτών, κ.α., τα οποία περιέχουν εξ ορισμού το στοιχείο του άνθρακα, το οποίο, κατά μέσο όρο, αποτελεί περίπου το μισό της μάζας της οργανικής ύλης του εδάφους. Κατά συνέπεια, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην πλανητική ισορροπία του άνθρακα, η οποία θεωρείται ως ο μείζων παράγοντας που επηρεάζει το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Brady & Weil, 2017). Υψηλή ποσότητα SOM, πρώτον, βελτιώνει τη δομή του εδάφους, ενισχύοντας τον αερισμό και τη διείσδυση των ριζών. Δεύτερον, αυξάνει την ικανότητα συγκράτησης νερού, προσδίδοντας ανθεκτικότητα σε φαινόμενα ξηρασίας. Τρίτον, βελτιώνει τη γονιμότητα, καθώς αποτελεί φυσική πηγή θρεπτικών στοιχείων, όπως το άζωτο, ο φώσφορος και το θείο, τα οποία απελευθερώνονται με την αποσύνθεση της οργανικής ύλης. Τέλος, η παρουσία της ενισχύει τη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους (Johnston et al., 2009; Brady & Weil, 2017).

Ο οργανικός άνθρακας στο έδαφος (Soil Organic Carbon – SOC) αποτελεί κλάσμα της οργανικής ύλης. Η αύξηση της διαθεσιμότητας οργανικού άνθρακα στο έδαφος μέσω εφαρμογής πρακτικών δέσμευσης συνδέεται με την ενίσχυση της εδαφικής μικροβιακής βιομάζας (Fierer, 2017). Συγκεκριμένα, αυξάνεται ο πληθυσμός σημαντικών οργανισμών και μυκορριζικών συμβιωτικών ειδών, τα οποία διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της λειτουργικότητας του εδάφους, στην υποστήριξη της φυτικής ανάπτυξης και στη ρύθμιση του βιογεωχημικού κύκλου του άνθρακα (Xue et al., 2020). Ωστόσο, παρά τη σημασία του οργανικού άνθρακα για την υγεία και τη λειτουργία των εδαφικών οικοσυστημάτων, τα αποθέματά του στα γεωργικά εδάφη παρουσιάζουν συνεχή μείωση σε παγκόσμιο επίπεδο (ADEME, 2013; Wiesmeier et al., 2019).

Επί πολλούς γεωλογικούς χρόνους, η διαδικασία δέσμευσης άνθρακα και ενσωμάτωσής του στα κατώτερα στρώματα του εδάφους ως μία δεξαμενή οργανικού άνθρακα αποτελεί μια θεμελιώδη φυσική διεργασία. Η διεργασία αυτή ξεκινά από τη φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών και απαιτεί την επαρκή διαθεσιμότητα ηλιακής ενέργειας, νερού και θρεπτικών στοιχείων. Επιπλέον, εξαρτάται και από τη δραστηριότητα των εδαφικών μικροοργανισμών, οι οποίοι συμμετέχουν στον μετασχηματισμό της οργανικής ύλης που βρίσκεται στο έδαφος (Bardgett et al., 2008). Συγκεκριμένα, οι μικροβιακές κοινότητες ρυθμίζουν τον ρυθμό αναπνοής του εδάφους και, κατ' επέκταση, την απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα προς την ατμόσφαιρα, μια διαδικασία που επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Karhu et al., 2014) (Σχήμα 8).



Σχήμα 8. Διαδικασίες μετασχηματισμού των υλικών του εδάφους και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δεξαμενών άνθρακα της βλάστησης, των μικροοργανισμών και του εδάφους. Το μπλε, καφέ και μωβ πλαίσιο αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τις δεξαμενές άνθρακα της βλάστησης, του εδάφους και των μικροοργανισμών. Οι γραμμές απεικονίζουν τις ροές άνθρακα μεταξύ των δεξαμενών.

Πηγή: Yu et al., 2025

Η σημασία της ροής άνθρακα από τα φυτά προς το έδαφος για τη συσσώρευση εδαφικού οργανικού άνθρακα έχει αναδειχθεί στη βιβλιογραφία της αναγεννητικής γεωργίας, μεταξύ άλλων και από την Christine Jones. Σύμφωνα με την προσέγγιση της, οι δύο βασικοί μηχανισμοί για την αύξηση της οργανικής ουσίας στο έδαφος αποτελούν, πρώτον, η μεταφορά των οργανικών ενώσεων στα κατώτερα στρώματα του εδάφους μέσω των ριζικών συστημάτων και, δεύτερον, η αλληλεπίδραση τους με τους εδαφικούς μικροοργανισμούς (Bardgett et al., 2008). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ένα μέρος του εδαφικού άνθρακα να σταθεροποιηθεί, αποκτώντας μια ανθεκτική μορφή που επιτρέπει τη μακροχρόνια διατήρησή του στο έδαφος.

3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη δέσμευση άνθρακα στο έδαφος

Η δέσμευση οργανικού άνθρακα στο έδαφος επηρεάζεται από ένα σύνολο φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων, όπως το κλίμα, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η βλάστηση και οι πρακτικές διαχείρισης της γης.

Πρωτίστως, η δεσμευτική και συσσωρευτική ικανότητα των εδαφών εξαρτάται από τον τύπο και τις ιδιότητες του εδάφους. Για παράδειγμα, εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο και λεπτόκοκκα σωματίδια παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη ικανότητα αποθήκευσης άνθρακα σε σύγκριση με εδάφη αμμώδους σύστασης (Chivenge et al., 2007).

Δεύτερον, οι διεργασίες παραγωγής οργανικής ύλης, δηλαδή η ανάπτυξη των φυτών, και αποδόμησή της, δηλαδή η μικροβιακή αποσύνθεση, ανταποκρίνονται διαφορετικά στην αύξηση της θερμοκρασίας. Ειδικότερα, υψηλές θερμοκρασίες ($> 25-35^{\circ}\text{C}$) και υγρασία επιταχύνουν την αποσύνθεση της οργανικής ύλης, καταλήγοντας σε μικρότερα αποθέματα άνθρακα. Αντίθετα, ψυχρότερα κλίματα επιβραδύνουν την αποσύνθεση, ώστε η ανάπτυξη των φυτών να ξεπερνά την αποδόμηση, καταλήγοντας σε μεγαλύτερη συσσώρευση οργανικού άνθρακα (Chivenge et al., 2007; Brady & Weil, 2017).

Στο τρίτο επίπεδο βρίσκονται οι γεωργικές πρακτικές και η διαχείριση της γης. Πρακτικές που μειώνουν τον άνθρακα, όπως η κατεργασία του εδάφους, η απομάκρυνση των φυτικών υπολειμμάτων και η διάβρωση, διαδραματίζουν επίσης ρόλο στη μακροχρόνια δέσμευση άνθρακα. Αντίθετα, η προσθήκη οργανικών εισροών μπορεί να ενισχύσει τη δέσμευση του οργανικού άνθρακα στο έδαφος (Chivenge et al., 2007; Brady & Weil, 2017). Η αποτελεσματικότητα των πρακτικών αυτών ως προς την αύξηση των αποθεμάτων οργανικού άνθρακα δεν είναι ίδια σε όλα τα αγροτικά συστήματα. Η αύξηση των αποθεμάτων SOC επηρεάζεται από το υφιστάμενο επίπεδο παραγωγικής έντασης. Συγκεκριμένα, εδάφη που έχουν υποστεί μακροχρόνια εντατική καλλιέργεια χαρακτηρίζονται από χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανικό άνθρακα και διαθέτουν μεγαλύτερο περιθώριο πρόσθετης δέσμευσης, σε αντίθεση με εδάφη που έχουν ήδη προσεγγίσει το δυναμικό κορεσμού τους. Κατά συνέπεια, σε εδάφη των οποίων τα αποθέματα οργανικού άνθρακα έχουν ήδη προσεγγίσει το δυναμικό κορεσμού τους, οι παρεμβάσεις στη διαχείριση – όπως η εφαρμογή οργανικών εισροών ή η ενσωμάτωση φυτικών υπολειμμάτων – τείνουν να επιφέρουν μόνο συγκρατημένες αυξήσεις στο SOC (Six et al., 2002). Αντίθετα, σημαντικότερες δυνατότητες ενίσχυσης των αποθεμάτων οργανικού άνθρακα παρατηρούνται σε αγροτικά συστήματα χαμηλής παραγωγικότητας, όπου η αύξηση της παραγωγής βιομάζας συνεπάγεται μεγαλύτερες εισροές

οργανικής ύλης στο έδαφος (Van der Esch et al., 2017). Ωστόσο, ακόμη και όταν εφαρμόζονται βελτιωμένες πρακτικές διαχείρισης που αυξάνουν την οργανική ουσία του εδάφους, η δέσμευση άνθρακα δεν συνεχίζεται επ' αόριστον με τον ίδιο ρυθμό. Καθώς το έδαφος προσεγγίζει μια νέα κατάσταση δυναμικής ισορροπίας, ο ρυθμός συσσώρευσης οργανικού άνθρακα μειώνεται προοδευτικά και τελικά σταθεροποιείται (Baveye et al., 2018; Rehberger et al., 2023).

Σύμφωνα με μία έρευνα που διεξήχθη στην Κίνα, εξετάστηκε το ισοζύγιο αερίων του θερμοκηπίου με συμβατικές διαχειριστικές πρακτικές, λαμβάνοντας υπόψη τη δέσμευση οργανικού άνθρακα, τις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου (N_2O) και μεθανίου (CH_4) από το έδαφος, καθώς και τις έμμεσες εκπομπές που προκύπτουν από την παραγωγική διαδικασία. Το αποτέλεσμα ήταν ότι, παρόλο που τα επίπεδα οργανικού άνθρακα αυξάνονταν, το καλλιεργητικό σύστημα αποτελούσε μια καθαρή πηγή αερίων του θερμοκηπίου (Gao et al., 2018). Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία της ολιστικής προσέγγισης που διαθέτει η αναγεννητική γεωργία, καθώς δεν εστιάζει μόνο στο έδαφος αλλά στο σύνολο των εκπομπών και διεργασιών που διαμορφώνουν το ισοζύγιο αερίων του θερμοκηπίου.

Καταλήγοντας, για την εφαρμογή των αναγεννητικών πρακτικών απαιτείται λεπτομερής αξιολόγηση ποικίλων παραγόντων που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητά τους ως προς τη δέσμευση οργανικού άνθρακα. Ειδικότερα, οι κλιματικές, εδαφικές, παραγωγικές και κοινωνικοοικονομικές συνθήκες καθορίζουν το επίπεδο απόδοσης των επιμέρους συνδυασμών αναγεννητικών πρακτικών (Khangura et al., 2023).

3.3 Πρακτικές αναγεννητικής γεωργίας σε δενδρώδεις καλλιέργειες

Ο συνδυασμός των αναγεννητικών πρακτικών προσαρμόζεται ανάλογα με το κλίμα, τον τύπο του εδάφους, το παραγωγικό σύστημα και τις οικονομικές δυνατότητες της εκμετάλλευσης.

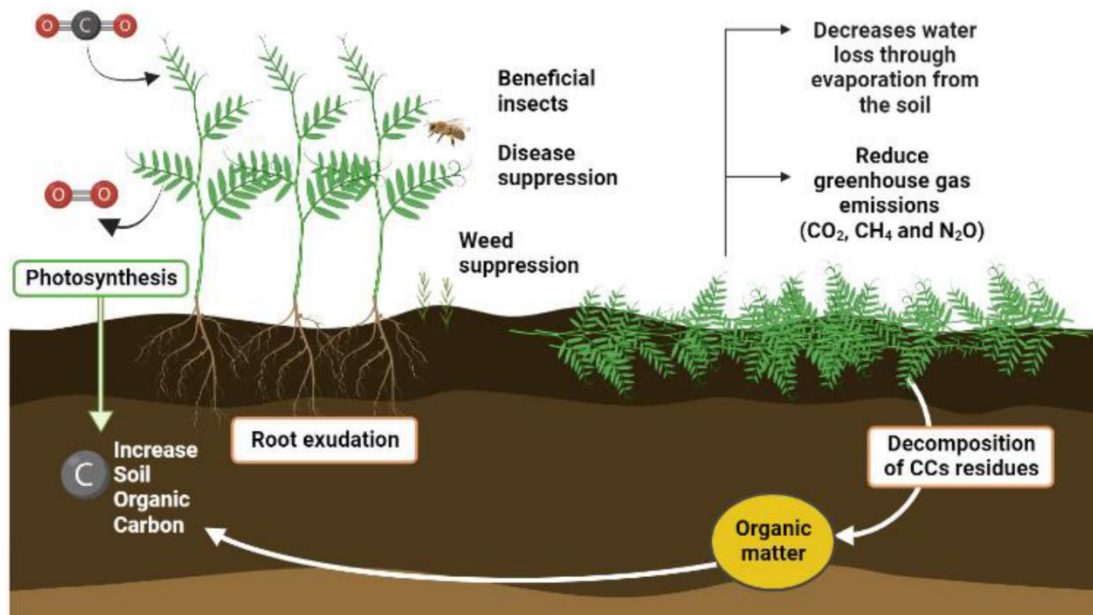
Κοινό στοιχείο για όλες τις πρακτικές αποτελεί η αξιοποίηση βιολογικών και οικολογικών διεργασιών, προκειμένου να επέλθει βελτίωση στην ανθεκτικότητα του συστήματος (Khangura et al., 2023; O'Donoghue et al., 2022).

3.3.1 Μόνιμη χορτοκάλυψη

Η μόνιμη χορτοκάλυψη (cover crops) αποτελεί μια διαδεδομένη πρακτική, όπου σε πολλές περιπτώσεις πραγματοποιείται με ζωντανή βλάστηση ενώ σε άλλες με τη διατήρηση φυτικών υπολειμμάτων στο υπέργειο μέρος του εδάφους. Οι συνηθέστερες μορφές ζωντανής βλάστησης είναι τα ψυχανθή, τα δημητριακά και τα αρωματικά φυτά. Μέσω αυτής της πρακτικής, το έδαφος προστατεύεται από συνθήκες διάβρωσης, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη ρύθμιση της

θερμοκρασίας και της υγρασίας του εδάφους, δηλαδή παραγόντων που επηρεάζουν την εδαφική σταθερότητα (Khangura et al., 2023; Giller et al., 2021).

Ο μηχανισμός δέσμευσης άνθρακα από τη μόνιμη χορτοκάλυψη βασίζεται στην αύξηση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, η οποία αποτελεί σημείο αφετηρίας της ροής του άνθρακα από το υπέργειο τμήμα του φυτού στο υπόγειο.



Σχήμα 9. Σχηματική απεικόνιση των επιδράσεων της χορτοκάλυψης (cover crops) στη λειτουργικότητα του εδάφους και στην αύξηση του οργανικού άνθρακα εδάφους μέσω φωτοσύνθεσης, ριζικών εκκρίσεων και αποδόμησης φυτικών υπολειμμάτων.

Πηγή: Blanco-Canqui & Ruis (2020)

Διαμεσολαβητής στη ροή αυτή αποτελεί το ριζικό σύστημα του φυτού, το οποίο μεταφέρει τον άνθρακα στα κατώτερα στρώματα προκειμένου να αλληλεπιδράσει με τους μικροοργανισμούς. Εκείνοι, με τη σειρά τους, μετατρέπουν μέρος του άνθρακα σε σταθερότερες μορφές ύλης, εξασφαλίζοντας τη μακροχρόνια αποθήκευση του στο έδαφος. Επιπλέον, όσο πιο εκτεταμένο είναι το ριζικό σύστημα των φυτών, όπως συμβαίνει σε έναν ελαιώνα, τόσο ευκολότερη είναι η μεταφορά του άνθρακα σε βαθύτερα στρώματα (Jones et al., 2009; White, 2020; Khangura et al., 2023).

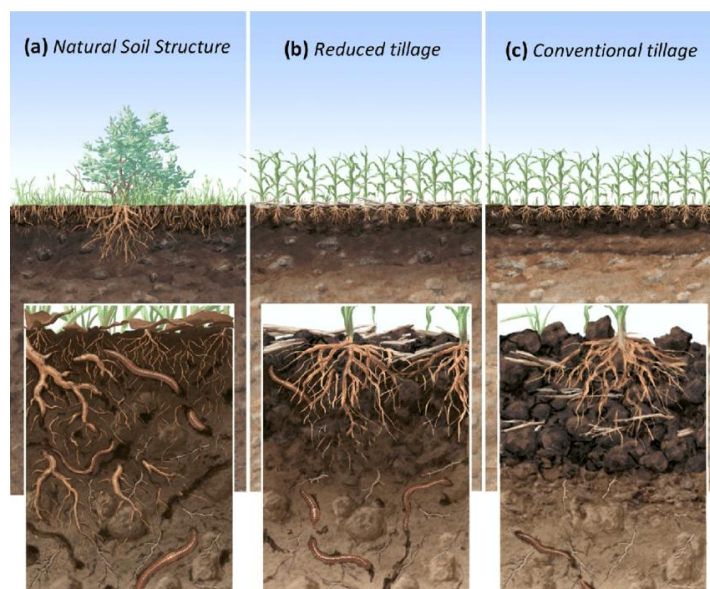
Ωστόσο, η μακροχρόνια διατήρηση του άνθρακα στο έδαφος εξαρτάται από τις εδαφοκλιματικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, σε περιοχές όπου επικρατεί ένα ξηροθερμικό, μεσογειακό κλίμα με περιορισμένη υγρασία και υψηλές θερμοκρασίες, η βιομάζα της

χορτοκάλυψης πιθανότατα μειώνεται, επιφέροντας ταχύτερη διάσπαση της οργανικής ύλης και μειώνοντας τη δέσμευση του άνθρακα (Soares et al., 2025).

Επιπλέον, σύμφωνα με μία μελέτη των Roberts et al. (2026), η εφαρμογή μόνιμης χορτοκάλυψης σε καλλιέργεια βαμβακιού βελτίωσε τη δυνατότητα διήθησης νερού στο έδαφος και αποθήκευσης υγρασίας. Η ανάλυση έδειξε ότι η διήθηση νερού αυξήθηκε κατά 23% και η απορρόφηση της βροχής κατά 13%, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα αυτά χρειάστηκαν έως και επτά φορές λιγότερο νερό άρδευσης σε σχέση με το συμβατικό σύστημα (Roberts et al., 2026).

3.3.2 Μειωμένη ή μηδενική κατεργασία

Ιστορικά, η κατεργασία του εδάφους αποτελεί μέρος της γεωργικής παραγωγής και οι παραγωγοί την εφαρμόζουν με σκοπό να αντιμετωπίσουν την αυτοφυή βλάστηση, να βελτιώσουν τον αερισμό του εδάφους κ.λπ. Από την άλλη πλευρά, η συστηματική αναστροφή του εδάφους περιορίζει τη δέσμευση του άνθρακα, καθώς επιταχύνει τη διάβρωση, αποδομεί την οργανική ουσία με πιο ταχύτερους ρυθμούς και διαταράσσει τη μικροβιακή δραστηριότητα. Για τον λόγο αυτό, η αναγεννητική γεωργία εστιάζει στη μειωμένη ή μηδενική κατεργασία, με στόχο την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών δέσμευσης και συσσώρευσης άνθρακα στο έδαφος (Giller et al., 2021; Rhodes, 2017; Soares et al., 2025).



Σχήμα 10. Απεικόνιση της επίδρασης διαφορετικής έντασης κατεργασίας στη δομή και τη βιολογική δραστηριότητα του εδάφους.

Πηγή: Lal, 2015

Παράλληλα, η συγκεκριμένη πρακτική συμβάλλει στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής μέσω της μείωσης των εκπομπών. Η υιοθέτηση της μηδενικής κατεργασίας οδηγεί σε μειωμένη χρήση γεωργικών μηχανημάτων και, κατ' επέκταση, μειωμένη κατανάλωση ορυκτών καυσίμων (Corbeels et al., 2016).

Στην περίπτωση των δενδρωδών καλλιεργειών, λόγω των πολυετών και βαθιών ριζών, επιτρέπεται η μεταφορά του άνθρακα σε ακόμη βαθύτερα στρώματα του εδάφους. Σύμφωνα με τους Soares και συνεργάτες (2025), η εστίαση μόνο στα ανώτερα στρώματα του εδάφους (20-30 cm) μπορεί να οδηγήσει σε υποεκτίμηση του πραγματικού δυναμικού δέσμευσης άνθρακα των συστημάτων μειωμένης κατεργασίας στους δενδρώνες (Soares et al., 2025).

3.3.3 Διαχείριση οργανικών εισροών στο έδαφος: κλαδευτική βιομάζα, οργανική λίπανση και κομποστοποίηση

Η σταδιακή και εν τέλει η πλήρης αντικατάσταση των ανόργανων λιπασμάτων από οργανικές εισροές θεωρείται κρίσιμη για την αποκατάσταση των φυσικών βιογεωχημικών κύκλων και της εδαφικής λειτουργικότητας. Η αναγεννητική διαχείριση των δενδρώνων εστιάζει στον περιορισμό της χρήσης συνθετικών αγροχημικών, τα οποία επιδρούν αρνητικά τόσο στη ζωή των μικροβιακών και μυκητιακών κοινοτήτων όσο και στα ωφέλιμα έντομα (White, 2020).

Η εφαρμογή οργανικών εισροών στις καλλιεργείες βελτιώνει την εδαφική δομή και επαναφέρει τον άνθρακα και τα θρεπτικά στοιχεία στο έδαφος (Ranjan et al., 2023). Οι πιο διαδεδομένες οργανικές εισροές είναι η κλαδευτική βιομάζα, η οργανική λίπανση και το κομπόστ. Η πρακτική αυτή, όπως και οι προηγούμενες, στοχεύει στη σταθεροποίηση της εδαφικής δομής και στην αποκατάσταση της μικροβιακής δραστηριότητας.

Στην περίπτωση των δενδρωδών καλλιεργειών, η κλαδευτική βιομάζα αποτελεί εσωτερικό πόρο και, επομένως, η αξιοποίησή της έπειτα από τεμαχισμό ή κομποστοποίηση, διατηρεί την ποσότητα άνθρακα εντός του ίδιου του οικοσυστήματος (Regni et al., 2017).

Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή οργανικής λίπανσης, όπως η κοπριά, ενώ συμβάλλει στη διαθεσιμότητα απαραίτητων θρεπτικών στοιχείων για τη φυτική ανάπτυξη, με λανθασμένο σχεδιασμό μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, υψηλές ποσότητες κοπριάς μπορούν να αυξήσουν τις εκπομπές υποξειδίου του αζώτου (N_2O). Για τον λόγο αυτό, κρίνεται απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι εδαφοκλιματικές συνθήκες και να σχεδιαστεί προσεκτικά η εφαρμογή της (Rhodes, 2017; Zhou et al., 2017; Giller et al., 2021).

Τέλος, η κομποστοποίηση θεωρείται η πιο επιθυμητή πρακτική συγκριτικά με τις προηγούμενες δύο, καθώς μέσω της διαδικασίας αυτής σχηματίζονται πιο σταθερές μορφές

οργανικής ύλης, οι οποίες αποδομούνται με πιο αργούς ρυθμούς και παραμένουν για μεγαλύτερη περίοδο στο έδαφος. Η κομποστοποίηση είναι μια διαδικασία παρασκευής χουμοειδών οργανικών υλικών, κατά την οποία οργανικά υλικά αναμειγνύονται υπό συνθήκες που ευνοούν την αερόβια αποδόμηση τους και τη διατήρηση των θρεπτικών στοιχείων. Το κομπόστ λειτουργεί ως οργανικό εδαφοβελτιωτικό, αυξάνοντας την περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανικό άνθρακα και θρεπτικά στοιχεία, ενώ ταυτόχρονα ενισχύει τη μικροβιακή δραστηριότητα και τη δομή του εδάφους. Επιπλέον, η χρήση κομπόστ συμβάλλει στη βελτίωση φυσικών ιδιοτήτων, όπως η πορώδης δομή και η ικανότητα συγκράτησης νερού, γεγονός που ενισχύει τη συνολική γονιμότητα και ανθεκτικότητα των αγροοικοσυστημάτων (Fornes et al., 2024). Βάσει της ανάλυσης που διεξήχθη από τους Panettieri et al. (2022) σε ξηρικούς ελαιώνες της Μεσογείου, η εφαρμογή κομπόστ από αστικά λύματα και πράσινα απόβλητα, οδήγησε σε καθαρή αποθήκευση άνθρακα που ξεπέρασε την ποσότητα άνθρακα που προστέθηκε με το κομπόστ έως και 50% (Panettieri et al., 2022). Σύμφωνα με τους Regni και συνεργάτες (2017), στις δενδρώδεις καλλιέργειες έχει αποδειχθεί ότι η εφαρμογή κομποστοποιημένης οργανικής ύλης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλότερων επιπέδων δέσμευσης άνθρακα σε σύγκριση με φρέσκα οργανικά υπολείμματα (Regni et al., 2017).

3.3.4 Αύξηση βιοποικιλότητας: πολυκαλλιέργειες και λειτουργική ποικιλότητα

Σύμφωνα με τους Baudron & Giller (2014), η διατήρηση και ενίσχυση της βιοποικιλότητας στα αγροτικά οικοσυστήματα θεωρείται σημαντικός παράγοντας για τη βιωσιμότητα της γεωργικής παραγωγής. Στο πλαίσιο της αναγεννητικής γεωργίας, η άποψη αυτή αποτελεί βασικό στόχο για την ενίσχυση του δυναμικού δέσμευσης άνθρακα. Σε πολυετή δενδρώδη συστήματα, όπως ο ελαιώνας, η εφαρμογή πολυκαλλιέργειας στον ίδιο αγρό επιτρέπει τόσο την αυξανόμενη ροή άνθρακα από το υπέργειο μέρος του φυτού στο υπόγειο όσο και τη σταθεροποίηση του με τη μορφή του εδαφικού οργανικού άνθρακα (SOC) (McCaughey & Barlow, 2023). Όπως τονίζει και ο White C. (2020), η πολυκαλλιέργεια αναπαράγει τη λειτουργία των οικοσυστημάτων και επιτρέπει την ανάπτυξη συμβιωτικών αλληλεπιδράσεων.

Συνήθως, οι πρακτικές που εφαρμόζονται είναι η αμειψισπορά και η πολυκαλλιέργεια. Στην αμειψισπορά, διαφορετικά είδη καλλιεργούνται διαδοχικά σε διαφορετικές περιόδους, ενώ στην πολυκαλλιέργεια διαφορετικά είδη καλλιεργούνται ταυτόχρονα στον ίδιο αγρό. Κοινό χαρακτηριστικό και των δυο πρακτικών είναι ότι ενισχύουν τη σταθερότητα του συστήματος, μειώνουν τους κινδύνους από εξάρσεις και ασθένειες και βελτιώνουν συνολικά την οικολογική αξία του αγροτικού τοπίου (Giller et al., 2021; Khangura et al., 2023).

3.3.5 Ενσωμάτωση ζώων

Η ενσωμάτωση της ζωικής παραγωγής στα αγροτικά συστήματα αποτελεί βασικό στοιχείο της αναγεννητικής γεωργίας, καθώς συμβάλλει στη βελτίωση της λειτουργικότητας του αγροοικοσυστήματος και στην αποκατάσταση των φυσικών κύκλων των θρεπτικών στοιχείων. Μέσω πρακτικών όπως η ελεγχόμενη και περιστροφική βόσκηση, τα ζώα εντάσσονται στο σύστημα όχι ως μεμονωμένη παραγωγική δραστηριότητα αλλά ως ενεργός παράγοντας αναγέννησης του εδάφους και ενίσχυσης της δέσμευσης άνθρακα (Cruz Colazo et al., 2022). Σύμφωνα με τους Rehberger et al. (2023), η εφαρμογή της περιστροφικής βόσκησης μπορεί να αυξήσει τον οργανικό άνθρακα στο έδαφος κατά 28%, με ρυθμούς δέσμευσης $0,28 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Rehberger et al., 2023).

Η παρουσία των ζώων στο αγροτικό τοπίο οδηγεί σε αυξημένες εισροές οργανικής ύλης, κυρίως μέσω της ζωικής κοπριάς και των φυτικών υπολειμμάτων που παραμένουν στο έδαφος. Οι εισροές αυτές ενισχύουν τη μικροβιακή δραστηριότητα και τη βιολογική ποικιλότητα του εδάφους, βελτιώνοντας τη δομή του και επιταχύνοντας τις διεργασίες αποσύνθεσης και σταθεροποίησης του οργανικού άνθρακα. Παράλληλα, η ενσωμάτωση ζώων ενισχύει την αποδοτικότητα του κύκλου των θρεπτικών στοιχείων. Η κοπριά λειτουργεί ως φυσική πηγή θρεπτικών, επιστρέφοντας άζωτο και άλλα στοιχεία στο έδαφος σε βιοδιαθέσιμες μορφές, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για εξωτερικές εισροές συνθετικών λιπασμάτων. Με τον τρόπο αυτό, το αγροτικό σύστημα προσεγγίζει μια περισσότερο κλειστή και αυτάρκη λειτουργία, στοιχείο που συνάδει με τις αρχές της αναγεννητικής γεωργίας (De Los Rios et al, 2022).

3.3.6 Μείωση της χρήσης συνθετικών λιπασμάτων

Σε συνδυασμό με την πρακτική των οργανικών εισροών, η προσέγγιση της μειωμένης χρήσης συνθετικών λιπασμάτων, ενισχύει τη βιολογική λειτουργία του εδάφους και την αποδοτικότητα των θρεπτικών στοιχείων. Η πρακτική αυτή επιδιώκει τον περιορισμό της εξάρτησης από εξωτερικές εισροές, μειώνοντας έμμεσα τις εκπομπές που προκύπτουν από την παραγωγική αλυσίδα των συνθετικών λιπασμάτων. Επιπλέον, συμβάλλει στην καλύτερη ευθυγράμμιση μεταξύ των θρεπτικών αναγκών των καλλιεργειών και της διαθεσιμότητας θρεπτικών στοιχείων στο έδαφος, ενισχύοντας τους εσωτερικούς κύκλους θρεπτικών και περιορίζοντας τις απώλειες (Khangura et al., 2023).

3.4 Οφέλη της Αναγεννητικής Γεωργίας

Η αναγεννητική γεωργία συνδέει διαφορετικά επίπεδα της λειτουργίας των αγροτικών συστημάτων μέσω αλληλεπιδράσεων. Βασίζεται στην αρχή της κυκλικότητας και υποστηρίζει

ένα κλειστό και αυτόνομο οικοσύστημα. Τα οφέλη της ταξινομούνται σε εδαφικά, οικολογικά και κλιματικά.

Η αποκατάσταση των εδαφών σε μια περίοδο εντατικής καλλιέργειας, η οποία υποβαθμίζει συνεχώς την ποιότητα του εδάφους, αποτελεί βασικό πυλώνα της αναγεννητικής γεωργίας. Μέσα από την εφαρμογή των πρακτικών αυτών, προβλέπεται αύξηση της οργανικής ουσίας, αποδοτικότερη αξιοποίηση των θρεπτικών στοιχείων και αποτελεσματικότερη συγκράτηση του νερού. Ως αποτέλεσμα, το έδαφος σταθεροποιείται και αποκτά ανθεκτικότητα στη διάβρωση και στις ακραίες καιρικές συνθήκες (White, 2020; Giller et al., 2021).

Σε οικολογικό επίπεδο, η αναγεννητική γεωργία υπογραμμίζει τη σημασία των μικροβιακών οργανισμών, και επομένως φροντίζει να δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες ανάπτυξής τους, καθώς αποτελούν βασικό στοιχείο της αλυσίδας μετατροπής του άνθρακα σε πιο σταθερές μορφές ύλης. Οι συνθήκες αυτές δημιουργούνται από την αυξημένη φυτική και λειτουργική ποικιλότητα, σε συνδυασμό με τη διατήρηση των ζωντανών ριζικών συστημάτων. Παράλληλα, μέσω της βιοποικιλότητας ενισχύεται η ανθεκτικότητα απέναντι σε εχθρούς και ασθένειες (Khangura et al., 2023; Feliciano et al., 2018).

Τέλος, τα κλιματικά οφέλη επικεντρώνονται στην ενίσχυση του δυναμικού δέσμευσης ατμοσφαιρικού άνθρακα και στη συμβολή της στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής μέσω της μείωσης των εκπομπών από την ίδια την αγροτική παραγωγή και της αντικατάστασης των συμβατικών πρακτικών με βιώσιμες. Η αλυσιδωτή συνέχεια των παραπάνω οφελών, καθιστά εφικτή τη δέσμευση του άνθρακα στα κατώτερα στρώματα του εδάφους. Ενδεικτικά, το Rodale Institute έχει υποστηρίξει ότι η καθολική υιοθέτηση αναγεννητικών πρακτικών σε γεωργικές και λιβαδικές εκτάσεις θα μπορούσε, σε θεωρητικό επίπεδο, να οδηγήσει σε επίπεδα δέσμευσης άνθρακα συγκρίσιμα ή και υψηλότερα από τις τρέχουσες ανθρωπογενείς εκπομπές CO₂ (Moyer et al., 2020). Ωστόσο, τέτοιες προσεγγίσεις βασίζονται σε σενάρια πλήρους εφαρμογής και υπογραμμίζουν τον κεντρικό ρόλο της αναγεννητικής γεωργίας στο πλαίσιο μιας ευρύτερης στρατηγικής (Lal, 2015; Giller et al., 2021; Gao et al., 2018).

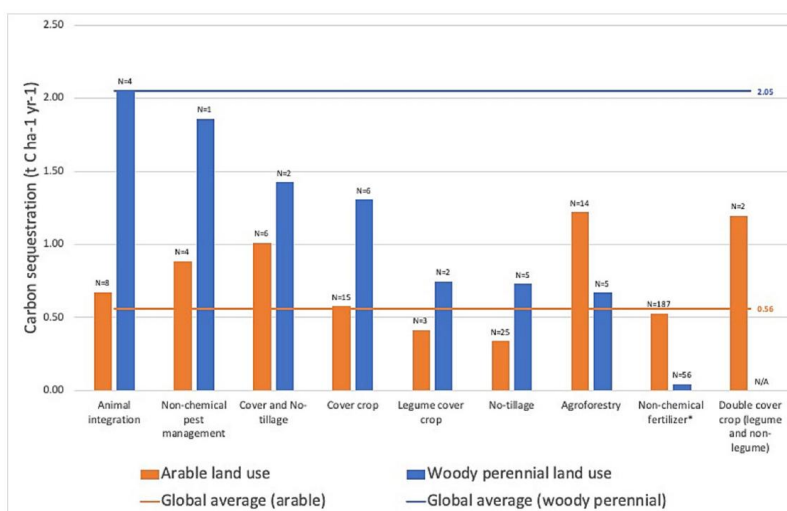
3.5 Δυναμικό δέσμευσης άνθρακα των αναγεννητικών πρακτικών

Το 2024, οι Villat και Nicolas δημοσίευσαν μια μελέτη στην οποία προσπάθησαν να ποσοτικοποιήσουν έναν ενιαίο ετήσιο ρυθμό δέσμευσης άνθρακα, εφαρμόζοντας βασικές πρακτικές της αναγεννητικής γεωργίας. Η μελέτη είχε δείγμα από 354 μετρήσεις σε αρόσιμες και ξυλώδεις καλλιέργειες, από περιοχές παγκοσμίως όπως την Βόρεια και Νότια Αμερική, την Ευρώπη, την Κίνα, την Νοτιοανατολική Ασία και άλλες περιοχές. Οι αναγεννητικές πρακτικές

τις οποίες έλαβαν υπόψη, ήταν τα φυτά κάλυψης, η ενσωμάτωση ζώων, η οργανική λίπανση, η χημική φυτοπροστασία, η μηδενική κατεργασία και η αγροδοασοπονία. Σε πρώτο επίπεδο, τα αποτελέσματα φαίνονται πιο αισιόδοξα στα πολυετή συστήματα συγκριτικά με τις αρόσιμες καλλιέργειες. Σε δεύτερο επίπεδο, προσπάθησαν να αναδείξουν τον συνδυασμό των πρακτικών που επιφέρουν υψηλότερους ρυθμούς δέσμευσης άνθρακα. Από τα αποτελέσματα, ξεχώρισαν οι συνδυασμοί συγκαλλιέργειας φυτών κάλυψης με μηδενική κατεργασία, καθώς και η ενσωμάτωση ζώων και η αγροδοασοπονία, επιβεβαιώνοντας τη σημασία της πολυδιάστατης διαχείρισης των αγροοικοσυστημάτων.

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται συγκριτικά οι ρυθμοί δέσμευσης άνθρακα ανά πρακτική και ανά είδος καλλιέργειας. Ως σημεία αναφοράς ορίστηκαν οι παγκόσμιοι μέσοι όροι που

προκύπτουν από δυο διαφορετικές μελέτες, των Zomer και συνεργατών (2017), η οποία αφορούσε τα αρόσιμα σύστημα και αντίστοιχα των Payen και συνεργατών (2021), για τα πολυετή.



Σχήμα 11. Μέσοι ρυθμοί δέσμευσης οργανικού άνθρακα στο έδαφος ανά πρακτική και κατηγορία χρήσης γης.

Πηγή: Jessica Villat and Kimberly A. Nicholas, 2024

Ωστόσο, οι ερευνητές τονίζουν ότι τα αποτελέσματα δεν επιβεβαιώνονται επαρκώς λόγω της έλλειψης δεδομένων και μετρήσεων σε πολλές περιοχές. Η ανάγκη αυτή μπορεί να καλυφθεί μέσω περαιτέρω ερευνών και μακροχρόνιων παρακολουθήσεων, ιδιαίτερα στον μεσογειακό γεωγραφικό χώρο, όπου η έλλειψη δεδομένων είναι μεγαλύτερη.

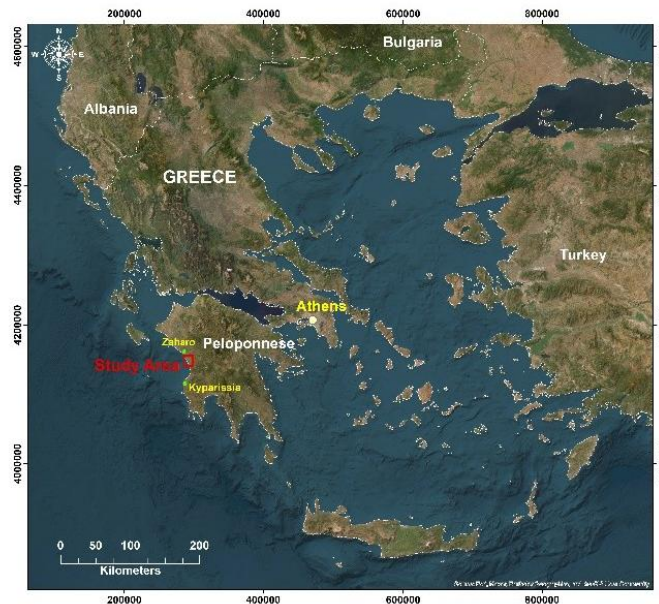
3.6 Περιορισμοί και εμπόδια εφαρμογής

Η εφαρμογή των αναγεννητικών πρακτικών ή ο συνδυασμός τους εξαρτάται από την προσεκτική αξιολόγηση του πλαισίου εφαρμογής. Η αποτελεσματικότητά της κυμαίνεται ανάλογα με τις κλιματικές, εδαφικές και διαχειριστικές συνθήκες, επομένως είναι απαραίτητο να προσαρμόζονται στις εκάστοτε ιδιαιτερότητες του εδάφους. Το γεγονός ότι δεν αποτελεί ένα συγκεκριμένο διαχειριστικό σύστημα, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν επιτόπιες μακροχρόνιες μελέτες και να εφαρμοστεί ένα σύστημα παρακολούθησης. Η γνώση από αυτές τις μελέτες θα δώσει μια εικόνα για τη βέλτιστη αντιστοίχιση μεταξύ πρακτικών και εδαφοκλιματικών συνθηκών που επιφέρει το υψηλότερο δυναμικό δέσμευσης άνθρακα. Έπειτα, οι αρμόδιοι φορείς θα αξιοποιήσουν αυτά τα αποτελέσματα, προκειμένου, πλέον εμπειριστά, να προσανατολίσουν τους παραγωγούς προς αυτήν την κατεύθυνση. Η συνολική και σχεδιασμένη προσπάθεια θα μπορούσε να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο ζήτημα της κλιματικής αλλαγής και η γεωργία πλέον να αποτελέσει μια καθαρή δεξαμενή άνθρακα (Khangura et al., 2023).

Ωστόσο, υπάρχει σοβαρή έλλειψη επιστημονικής τεκμηρίωσης λόγω περιορισμένων μακροχρόνιων μελετών, οι οποίες απαιτούν χρόνο και οικονομικούς πόρους. Το γεγονός αυτό περιορίζει τη δυνατότητα εφαρμογής της σε εθνικά σχέδια δράσης μέσω προγραμμάτων (Kelly, 2020).

Κεφάλαιο 4^ο Υπολογισμός της Μεταβολής Αποθέματος Οργανικού Άνθρακα Εδάφους (ΔSOC) από Μεταβολή Διαχείρισης σε Μεσογειακό Ελαιώνα

Σε μία προσπάθεια απόδειξης της σημασίας εφαρμογής των αναγεννητικών πρακτικών, χρησιμοποιήθηκε μια χαρτογράφηση στο πλαίσιο ερευνητικής δραστηριότητας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Η χαρτογράφηση αφορά μια ελαιοπαραγωγική έκταση στα δυτικά της Πελοποννήσου. Η ποσοτικοποίηση σε αυτήν τη μελέτη θα βασιστεί στα δεδομένα της συγκεκριμένης χαρτογράφησης, δηλαδή στο είδος της καλλιέργειας και στις εδαφοκλιματικές συνθήκες.



Σχήμα 12. Χωρική θέση της πόλης Ζαχάρως στην Πελοπόννησο, Ελλάδα, και της περιοχής μελέτης (κόκκινο πλαίσιο)

Πηγή: Psomiadis et al., 2020.

Η ανάλυση βασίζεται στη σύγκριση μεταξύ συμβατικής και αναγεννητικής διαχείρισης, προκειμένου να αναδείξει το θετικό αποτύπωμα της υιοθέτησης αναγεννητικών πρακτικών. Για τις ανάγκες της ανάλυσης, η υπέργεια παραγωγικότητα, δηλαδή η μεταβολή του όγκου της κόμης, θεωρείται σταθερή και δίνεται έμφαση αποκλειστικά στη μεταβολή του αποθέματος οργανικού άνθρακα του εδάφους (SOC), σύμφωνα με το πλαίσιο stock-change του IPCC.

4.1 Στόχος, ερευνητικό ερώτημα και ορισμός της μεταβολής

Ο στόχος της παρούσας ενότητας εστιάζει στην εκτίμηση της μεταβολής στη συνολική δέσμευση άνθρακα ως αποτέλεσμα της αντικατάστασης των συμβατικών πρακτικών με αναγεννητικές, υπό τις ίδιες συνθήκες. Η ανάλυση βασίζεται στην προσέγγιση που έχει αναπτύξει ο IPCC και δίνει έμφαση στη μεταβολή του οργανικού αποθέματος ως βασική παράμετρο διαφοροποίησης μεταξύ των δύο σεναρίων.

Το κεντρικό ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας ανάλυσης είναι η ποσοτική εκτίμηση της μεταβολής της ετήσιας δέσμευσης άνθρακα (ΔC) που προκύπτει από τη μετάβαση σε αναγεννητικές διαχειριστικές πρακτικές σε ελαιώνα της Πελοποννήσου, υπό την παραδοχή ότι η υπέργεια και υπόγεια παραγωγικότητα παραμένει σταθερή και ότι η διαφοροποίηση εντοπίζεται στη δεξαμενή του οργανικού άνθρακα του εδάφους.

4.2. Δεξαμενές άνθρακα σε αγροτικά οικοσυστήματα

Οι τέσσερις βασικές δεξαμενές άνθρακα σε ένα αγροτικό οικοσύστημα είναι η υπέργεια βιομάζα (Aboveground Biomass – AGB), η υπόγεια βιομάζα (Belowground Biomass – BGB), η νεκρή οργανική ύλη και ο οργανικός άνθρακας του εδάφους (Soil Organic Carbon – SOC) (IPCC, 2006; Ravindranath & Ostwald, 2008). Μεταξύ των τεσσάρων δεξαμενών, ο οργανικός άνθρακας του εδάφους αποτελεί την πιο μακροχρόνια δεξαμενή, όπου μπορεί να συμβάλει στον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

Δεδομένου ότι στην συγκεκριμένη ανάλυση, η μελέτη εστιάζει σε μόνιμη δενδρώδη καλλιέργεια, η υπέργεια βιομάζα, που εντοπίζεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, αποτελείται κυρίως από ξυλώδη και φυλλική βιομάζα. Η ξυλώδης βιομάζα συνδέεται με το μεγαλύτερο ποσοστό αποθέματος άνθρακα, ενώ το φύλλωμα αποτελεί βραχυχρόνιο μέσο δέσμευσης άνθρακα. Από την άλλη, η υπόγεια βιομάζα μιας μόνιμης καλλιέργειας, όπως η ελιά, αναφέρεται στα ζωντανά τμήματα του φυτού κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, και αποτελείται εξ ολοκλήρου από το ριζικό σύστημα.

Στις δενδρώδεις καλλιέργειες, η περιεκτικότητα του άνθρακα στην ξηρή φυτική βιομάζα αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την εκτίμηση των αποθεμάτων άνθρακα. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον IPCC (2006), η προσεγγιστική τιμή είναι 0,47 (βλ. Παράρτημα Α) και χρησιμοποιείται ευρέως όταν δεν υπάρχουν ειδικά δεδομένα για το εξεταζόμενο είδος (McGroddy et.al, 2004). Η τιμή λειτουργεί ως συντελεστής μετατροπής της ξηρής βιομάζας σε απόθεμα άνθρακα.

Η γενική διατύπωση της μεταβολής του συνολικού αποθέματος άνθρακα συμπεριλαμβάνοντας τις επιμέρους δεξαμενές, με σκοπό την σύγκριση της αναγεννητικής και συμβατικής διαχείρισης, αποτυπώνεται ως εξής:

$$\Delta C_{total} = C_{regen} - C_{baseline}$$

(1)

$$\Delta C = (\Delta CAGB + \Delta CBGB + \Delta CSOC, regen) - (\Delta CAGB + \Delta CBGB + \Delta CSOC, baseline)$$

(2)

Εφόσον η μελέτη περίπτωσης αφορά ελαιώνα όπου τα δένδρα είναι εγκατεστημένα και ώριμα, και παράλληλα, η χρήση γης παραμένει ίδια, η αλλαγή στον τρόπο καλλιεργητικής διαχείρισης θα επηρεάσει σε σημαντικότερο βαθμό τον εδαφικό οργανικό άνθρακα. Δηλαδή, ο βαθμός κατεργασίας, η κάλυψη του εδάφους και η εφαρμογή οργανικών λιπασμάτων, ως αναγεννητικές πρακτικές, θα επιφέρουν μεταβολή στον εδαφικό οργανικό άνθρακα και όχι τόσο στις άλλες δυο δεξαμενές. Επομένως, για τις ανάγκες της ανάλυσης, οι δεξαμενές άνθρακα πάνω και κάτω από την επιφάνεια του εδάφους θεωρούνται σταθερές μεταξύ των δυο σεναρίων.

Συνεπώς, η εξίσωση (2) απλοποιείται σε:

$$\Delta C_{total} = \Delta CSOC, regen - \Delta CSOC, baseline$$

(3)

Ως εκ τούτου, η μεταβολή που εξετάζεται στο παρόν κεφάλαιο αφορά αποκλειστικά τη διαφορά στο απόθεμα οργανικού άνθρακα του εδάφους που αποδίδεται στη μεταβολή των πρακτικών διαχείρισης.

Στην περίπτωση των μονοετών καλλιεργειών, η υπέργεια και υπόγεια βιομάζα παρουσιάζουν έντονη ετήσια δυναμική. Ωστόσο, κατά τη σύγκριση μεταξύ των σεναρίων διαχείρισης, η συμβολή τους στη μεταβολή του συνολικού αποθέματος άνθρακα εξαρτάται από το κατά πόσο η συνολική παραγωγικότητα διαφοροποιείται μεταξύ των σεναρίων. Η βασική διαφορά των μονοετών καλλιεργειών συγκριτικά με τις πολυετείς έγκειται στο γεγονός ότι οδηγούν σε απώλειες άνθρακα από την ανάγκη εντατικής κατεργασίας του εδάφους, επομένως προκύπτουν απώλειες οργανικού άνθρακα μέσω αυξημένης αποσύνθεσης και διάβρωσης. Από την άλλη, οι πολυετείς λόγω των ισχυρών ριζικών συστημάτων, καθιστούν εφικτή την αύξηση των αποθεμάτων.

4.3 Πλαίσιο Ανάλυσης και ορισμός σεναρίων

Προκειμένου η ανάλυση να είναι συνεπής και συγκρίσιμη, πρέπει να οριστούν τα όρια μέσα στα οποία εξετάζεται το σύστημα. Η εκτίμηση της μεταβολής της δέσμευσης άνθρακα πραγματοποιείται:

(α) σε γεωγραφικό επίπεδο, το οποίο αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο αγροτεμάχιο όπου εφαρμόζονται οι εναλλακτικές διαχειριστικές πρακτικές, και

(β) σε λειτουργικό επίπεδο, το οποίο αφορά τις δεξαμενές άνθρακα που επηρεάζονται από τις πρακτικές.

4.3.1 Χωρικά και χρονικά όρια ανάλυσης

Η ανάλυση επικεντρώνεται σε μεσογειακούς ελαιώνες, υπό τυπικές μεσογειακές κλιματικές συνθήκες. Το σύστημα θεωρείται ως μόνιμη δενδρώδης καλλιέργεια σε ορυκτά εδάφη (mineral soils), χωρίς να υφίσταται καμία διαφοροποίηση ως προς τη χρήση γης μεταξύ των σεναρίων που συγκρίνονται.

Η εκτίμηση του οργανικού άνθρακα περιορίζεται στο βάθος 0-30 cm, ένα βάθος το οποίο έχει οριστεί ως πρότυπο βάθος βάσει του IPCC για αγροτικά οικοσυστήματα και ο ορισμός του επιτρέπει τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, μελέτη των Soares και συνεργατών, αναφέρουν ότι το συγκεκριμένο βάθος, στην περίπτωση των δενδρώνων, μπορεί να υποεκτιμήσει το πραγματικό δυναμικό δέσμευσης άνθρακα (Soares et al., 2025).

Όσον αφορά τη χρονική διάσταση, η μεταβολή του αποθέματος οργανικού άνθρακα υπολογίζεται σε διάστημα 20 ετών, ένας χρονικός ορίζοντας που αποτελεί επίσης μία τυπική περίοδο προσαρμογής που υιοθετείται σύμφωνα με το πλαίσιο του IPCC. Η ετήσια μεταβολή προκύπτει από την αναγωγή της συνολικής διαφοροποίησης του αποθέματος σε αυτό το χρονικό διάστημα.

4.3.3 Παραδοχές μοντέλου

Στην συγκεκριμένη ανάλυση λαμβάνονται ορισμένες παραδοχές που αφορούν τα σενάρια σύγκρισης. Η πρώτη παραδοχή εστιάζει στην χρήση γης, όπου και στα δυο σενάρια η ελαιοπαραγωγή αποτελεί την κύρια καλλιέργεια, χωρίς να αλλάξει στα δεδομένα. Η δεύτερη ορίζει την υπέργεια και υπόγεια βιομάζα ως σταθερές τιμές μεταξύ της συμβατικής και αναγεννητικής διαχείρισης, ώστε η μεταβολή της βιομάζας των δύο συστημάτων να θεωρείται μηδενική, για λόγους απλοποίησης. Αυτό συμβαίνει γιατί η ανάλυση εστιάζει στις διαχειριστικές πρακτικές και όχι σε κάποια αλλαγή στα μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών ή στην πυκνότητα της υπέργειας βιομάζας. Συμπληρωματικά σε αυτήν την παραδοχή, η

τρίτη, ορίζει ότι η συνολική μεταβολή δέσμευσης άνθρακα που θα προκύψει θα προέρχεται αποκλειστικά από τη δεξαμενή του οργανικού άνθρακα, ως αποτέλεσμα της αντικατάστασης πρακτικών που επηρεάζουν άμεσα τα επίπεδα αυτά. Η τελευταία παραδοχή αφορά τον τρόπο υπολογισμού της εκτίμησης του SOC, και συγκεκριμένα τη χρήση τυποποιημένων συντελεστών μεταβολής σύμφωνα με τη μεθοδολογία του IPCC, εφόσον δεν ήταν εφικτή η εκτίμηση μέσω επιτόπιων δειγματοληψιών εδάφους.

Συμπερασματικά, η ανάλυση εκφράζει τη μεταβολή του οργανικού άνθρακα στο εδάφους μεταξύ των δυο διαχειριστικών σεναρίων σε τόνους άνθρακα ανά εκτάριο ($t\ CO_2/ha$) και μετατρέπεται σε ισοδύναμο CO_{2eq} .

4.3.4 Ορισμός συμβατικής και αναγεννητικής διαχείρισης

Στόχος της παρούσας ανάλυσης είναι να αναδειχθεί η διαφορά στο δυναμικό δέσμευσης άνθρακα που προκύπτει αποκλειστικά από την αλλαγή στις εφαρμοζόμενες διαχειριστικές πρακτικές. Η δημιουργία διαφορετικών σεναρίων για τη σύγκριση απαιτεί τον προκαθορισμό των συνθηκών σε καθένα από αυτά. Κοινό στοιχείο και στα δύο σενάρια αποτελεί η διατήρηση της χρήσης γης.

Ως συμβατική διαχείριση ορίζεται η προϋπάρχουσα κατάσταση που θεωρείται ως σημείο αναφοράς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για τη βέλτιστη απόδοσης της καλλιέργειας, θεωρείται ότι η βλάστηση στις μεσοσειρές αντιμετωπίζεται μέσω μηχανικής ή χημικής καταστολής, με περιορισμένη ή μηδενική οργανική ενίσχυση του εδάφους. Επιπλέον, το έδαφος παραμένει για αρκετούς μήνες γυμνό, καθώς απομακρύνονται τα γεωργικά υπολείμματα και εφαρμόζεται σε συστηματική συχνότητα διατάραξη του εδάφους μέσω κατεργασίας.

Από την άλλη, η αναγεννητική διαχείριση προσεγγίζει το έδαφος ως ένα δυναμικό οικοσύστημα. Στο πλαίσιο αυτό, εφαρμόζεται μόνιμη χορτοκάλυψη, μειώνεται η κατεργασία και αξιοποιούνται τα υπολείμματα κλαδέματος ως οργανική εισροή, σε συνδυασμό με την εφαρμογή ζωικών λιπασμάτων.

Η διαφοροποίηση των δύο σεναρίων ως προς τις πρακτικές διαχείρισης οδηγεί σε διαφορετικούς συντελεστές που επηρεάζουν τη συνολική δέσμευση οργανικού άνθρακα στο έδαφος. Δεδομένου ότι η χρήση γης και το αρχικό απόθεμα άνθρακα δεν επιδέχονται διαφοροποιήσεις, η μεταβολή της δέσμευσης του άνθρακα προκύπτει αποκλειστικά από τις διαφορετικές πρακτικές στον αγρό.

4.3 Μεθοδολογία IPCC για SOC

Η προσέγγιση που ακολουθεί η παρούσα ανάλυση βασίζεται στη μεθοδολογία του IPCC. Η μεθοδολογία διαμορφώνεται σε τρία επίπεδα (Tier 1, 2 και 3), τα οποία διαφοροποιούνται ως προς τον βαθμό εξειδίκευσης των δεδομένων που χρησιμοποιούνται. Τα επίπεδα Tier 2 και Tier 3 βασίζονται σε αποτελέσματα επίτοπιων μετρήσεων ή σε εξειδικευμένες εθνικές ή τοπικές τιμές. Αντίθερα, το επίπεδο Tier 1, επιτρέπει την αξιοποίηση τυποποιημένων συντελεστών μεταβολής, οι οποίοι καθορίζονται βάσει των κλιματικών και διαχειριστικών χαρακτηριστικών. Η επιλογή αυτή καθιστά εφικτή τη συγκρίσιμη εκτίμηση της μεταβολής του οργανικού άνθρακα του εδάφους που προκύπτει από αλλαγές στις διαχειριστικές πρακτικές, ακόμη και στην απουσία εδαφικών μετρήσεων ή εθνικών συντελεστών.

Στο πλαίσιο αυτό, το απόθεμα οργανικού άνθρακα του εδάφους εκφράζεται ως το γινόμενο ενός βασικού αποθέματος αναφοράς (SOC_{ref}) επί των συντελεστών που αποτυπώνουν τη χρήση γης και τις εφαρμοζόμενες πρακτικές. Το βασικό απόθεμα αναφοράς αντιπροσωπεύει μια τιμή ανάλογα με τις κλιματικές και εδαφικές συνθήκες της περιοχής, στην παρούσα ανάλυση της Πελοποννήσου. Οι υπόλοιπες μεταβλητές της εξίσωσης είναι ο συντελεστής χρήσης γης (F_{LU}), ο συντελεστής διαχείρισης (F_{MG}) και ο συντελεστής οργανικών εισροών (F_I). Η μορφή της σχέσης παρουσιάζεται παρακάτω:

$$SOC = SOC_{ref} \times F_{LU} \times F_{MG} \times F_I \quad (4)$$

Στην παρούσα μελέτη, ο συντελεστής F_{LU} παραμένει σταθερός και στα δυο σενάρια, καθώς η χρήση γης παραμένει ίδια. Επομένως, η διαφοροποίηση μεταξύ συμβατικής και αναγεννητικής γεωργίας εντοπίζεται στους συντελεστές F_{MG} και F_I , οι οποίοι εκφράζουν τον βαθμό στον οποίο το έδαφος έχει υποστεί κατεργασία και το επίπεδο ενσωμάτωσης οργανικών εισροών, αντίστοιχα.

Διατυπώνοντας το απόθεμα του οργανικού άνθρακα σε καθένα από τα δύο σενάρια, οι σχέσεις αποτυπώνονται ως εξής:

Για το σενάριο αναφοράς,

$$SOC_{baseline} = SOC_{ref} \times F_{LU} \times F_{MG,baseline} \times F_{I,baseline} \quad (5)$$

Και για το αναγεννητικό σενάριο,

$$SOC_{regen} = SOC_{ref} \times F_{LU} \times F_{MG,regen} \times F_{I,regen}$$

(6)

Η μεταβολή του οργανικού άνθρακα στα αποθέματα του εδάφους, προκύπτει από την αφαίρεση των δύο παραπάνω σχέσεων:

$$SOC = SOC_{regen} - SOC_{baseline}$$

(7)

Προκειμένου το αποτέλεσμα να μπορεί να ερμηνευθεί με κλιματικούς όρους, η τιμή που εκφράζει τη μεταβολή στο απόθεμα άνθρακα για τον χρονικό ορίζοντα των 20 ετών μετατρέπεται σε ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα (CO_{2eq}) μέσω του λόγου μοριακών βαρών:

$$\Delta CO_{2eq} = \Delta SOC \times \frac{44}{12}$$

(8)

Τέλος, η ετήσια μεταβολή προκύπτει από τη διαίρεση του συνολικού αποθέματος στο χρονικό διάστημα των 20 ετών.

$$\Delta SOC_{annual} = \frac{\Delta SOC}{20}$$

(9)

Με τον τρόπο αυτό, η αλλαγή στην εφαρμογή εναλλακτικών και πιο βιώσιμων πρακτικών μπορεί να ποσοτικοποιηθεί σε επίπεδο τυποποιημένης μεθοδολογίας και όχι αποκλειστικά μέσω μετρήσεων και εξειδικευμένων τοπικών τιμών.

4.4 Υπολογισμός του αποθέματος αναφοράς (SOC_{ref})

Για τον υπολογισμό του αποθέματος αναφοράς (SOC_{ref}), η ανάλυση βασίστηκε στις Κατευθυντήριες Οδηγίες του IPCC (2006), στον χάρτη του Ευρωπαϊκού Κέντρου Δεδομένων Εδάφους (ESDAC) και στη βάση δεδομένων Εναρμονισμένη Παγκόσμια Βάση Δεδομένων Εδαφών (Harmonized World Soil Database - HWSO). Επιπλέον, για σκοπούς επαλήθευσης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO) και του Παγκόσμιου Χάρτη Οργανικού Άνθρακα (Global Soil Organic Carbon Map - GSOCmap).

Οι κατηγορίες εδάφους που προκύπτουν από την Εναρμονισμένη Παγκόσμια Βάση Δεδομένων Εδαφών (Harmonized World Soil Database - HWSD) v2.0 και από τους Sinitambirivoutin et al. (2024) παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

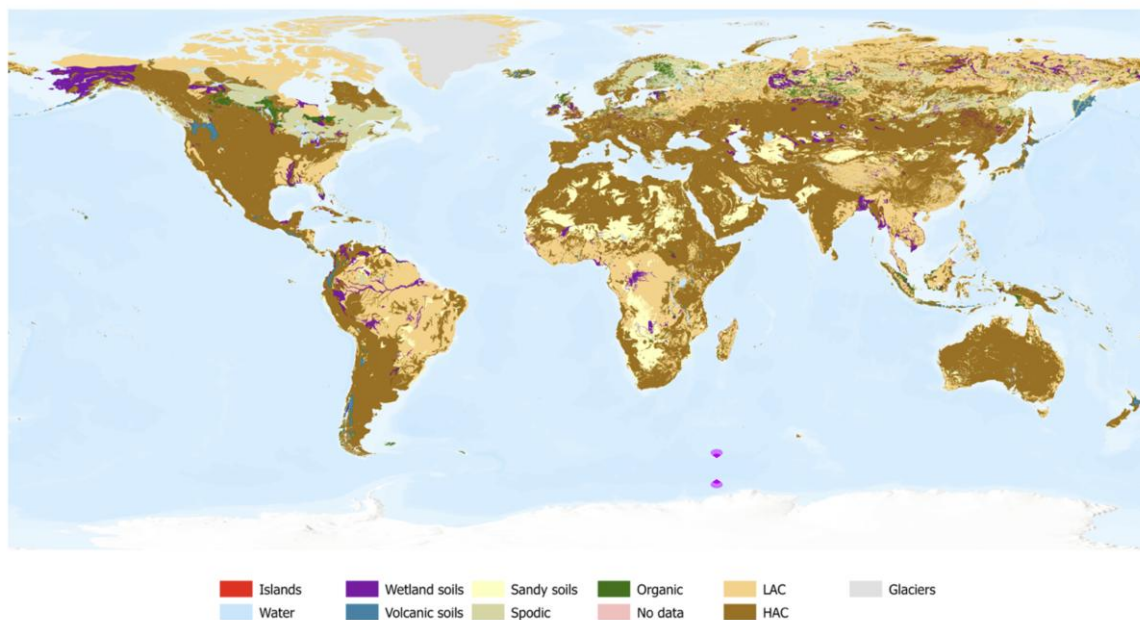


Fig. 3. IPCC major Soil Types derived from HWSD v2.0 and the WRB classification.

Σχήμα 13. Παγκόσμια κατανομή των κύριων κατηγοριών εδάφους σύμφωνα με την ταξινόμηση του IPCC.

Πηγή: Sinitambirivoutin et. al (2024)

Για τον προσδιορισμό της κατηγορίας εδάφους στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε η απαγωγική μέθοδος μεταξύ των παρακάτω κατηγοριών εδάφους. Αρχικά, απορρίφθηκαν οι κατηγορίες Organic και Wetland, καθώς αυτές αντιστοιχούν σε εδάφη με πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε οργανική ύλη, χαρακτηριστικά που δεν παρατηρούνται στον μεσογειακό αγροτικό χώρο. Έπειτα, η κατηγορία Spodic επίσης απορρίπτεται, καθώς χαρακτηρίζει περιοχές με ψυχρό κλίμα, υψηλά επίπεδα υγρασίας και υψηλή συγκέντρωση αλουμινίου ή σιδήρου, συνήθως δασικά οικοσυστήματα (Lundström, van Breemen, & Bain, 2000). Παράλληλα, η κατηγορία Volcanic δεν είναι αντιπροσωπευτική για την περιοχή μελέτης, καθώς τέτοια εδάφη σχετίζονται με ηφαιστειακές γεωμορφολογικές συνθήκες. Τέλος, η κατηγορία Sandy soils δεν θεωρείται κατάλληλη για την περιοχή μελέτης, δεδομένου ότι η μέση περιεκτικότητα άμμου κυμαίνεται στο 41-48 % σύμφωνα με το ESDAC (Βλέπε Παράρτημα A2). Οι πιθανότερες κατηγορίες εδάφους είναι η High Activity Clay και Low Activity Clay, οι οποίες αντιστοιχούν σε εδάφη με σημαντική παρουσία αργιλικών ορυκτών. Σύμφωνα με το

ESDAC, η περιοχή μελέτης αντιστοιχεί σε μέση περιεκτικότητα αργίλου περίπου 22-27% (βλ. Παράρτημα Α1).

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες εδαφών που χρησιμοποιούνται στη μεθοδολογία IPCC

Κατηγορία εδάφους	Περιγραφή
HAC soils (High Activity Clay)	Εδάφη με άργιλο υψηλής δραστηρότητας, με μικρό έως μέτριο βαθμό αποσάρθρωσης
LAC soils (Low Activity Clay)	Εδάφη με άργιλο χαμηλής δραστηρότητας, με υψηλό βαθμό αποσάρθρωσης
Sandy soils	Εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα άμμου (>70%) και χαμηλή ικανότητα συγκράτησης νερού και θρεπτικών στοιχείων
Spodic soils	Εδάφη που παρουσιάζουν έντονη διεργασία ποδζολίωσης ⁴ (podzolization)
Volcanic soils	Εδάφη που προέρχονται από ηφαιστειακή τέφρα
Wetland soils	Εδάφη με περιορισμένη αποστράγγιση, η οποία οδηγεί σε περιοδικές πλημμυρικές συνθήκες και ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών

Πηγή: Προσαρμογή από HWSD & Sinitambirivoutin et al. (2024).

Λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα εδαφολογικά δεδομένα της περιοχής και τη μεσογειακή γεωμορφολογία, το έδαφος της περιοχής μελέτης κατατάσσεται σε υφές *clay loam* έως *sandy clay loam*, οι οποίες αντιστοιχούν σε εδάφη με μέτρια έως υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο και άμμο και παρουσιάζουν υψηλότερη δραστηρότητα αργιλικών ορυκτών. Οι δομές αυτές συνδέονται συνήθως με την κατηγορία *High Activity Clay* στο σύστημα ταξινόμησης του IPCC.

Έπειτα, το συμπέρασμα αυτό σε συνδυασμό με την κλιματική ζώνη της περιοχής μελέτης, οδηγεί στην υπόδειξη της τιμής που θα ληφθεί υπόψη για το SOC_{ref}. Συνοψίζοντας, η κλιματική ζώνη χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή υγρασία και η κατηγορία του εδάφους χαρακτηρίζεται από υψηλή δραστηρότητα αργιλικών ορυκτών. Εάν οι

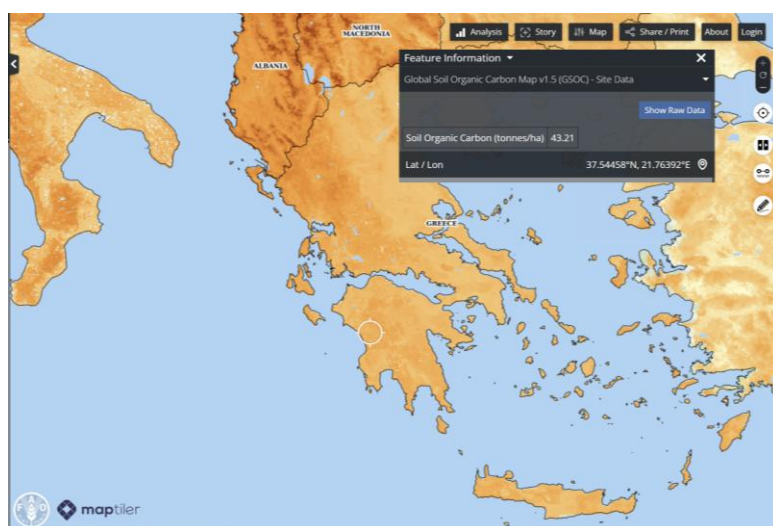
⁴ Η ποδζολίωση (podzolization) είναι μια εδαφογενετική διεργασία κατά την οποία συμβαίνει έκπλυση και μετακίνηση οργανικής ύλης, σιδήρου (Fe) και αλουμινίου (Al) από τα ανώτερα στρώματα του εδάφους προς βαθύτερους ορίζοντες.

πληροφορίες αυτές αποτυπώνονται στον Πίνακα 2.3 των Κατευθυντήριων Οδηγιών του IPCC, η τιμή που προκύπτει είναι:

$$SOC_{refIPCC} = 38 \text{ t C ha}^{-1}(0 - 30 \text{ cm})$$

Για την υποστήριξη και επαλήθευση της τιμής αυτής χρησιμοποιήθηκε επιπλέον το παγκόσμιο σύνολο δεδομένων *Global Soil Organic Carbon Map v1.5* (GSOCmap), το οποίο έχει αναπτυχθεί από τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO). Σύμφωνα με το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων, η εκτιμώμενη τιμή αποθέματος οργανικού άνθρακα στην περιοχή μελέτης ορίζεται περίπου σε:

$$SOC_{refGSOCmap} = 43,21 \text{ t C ha}^{-1}(0 - 30 \text{ cm})$$



Σχήμα 14. Παγκόσμια κατανομή αποθεμάτων οργανικού άνθρακα στο έδαφος και θέση της περιοχής μελέτης.

Πηγή: FAO, *Global Soil Information System (GLOIS)*, διαθέσιμο στο:

<https://data.apps.fao.org/glois/>

Η σύγκριση των δύο πηγών δείχνει παρόμοια τάξη μεγέθους των τιμών, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της εκτίμησης σε αυτό το επίπεδο μελέτης. Ωστόσο, στους υπολογισμούς διατηρήθηκε η τιμή αναφοράς που προκύπτει από τη μεθοδολογία του IPCC Tier 1, ώστε να είναι συμβατή με τους υπόλοιπους υπολογισμούς.

4.4.1 Παραμετροποίηση συμβατικού σεναρίου (Baseline)

Για τη διαμόρφωση του συμβατικού σεναρίου χρησιμοποιούνται οι προεπιλεγμένες τιμές του IPCC (2019 Refinement, Volume 4 – AFOLU, Chapter 5), οι οποίες ορίζουν τους συντελεστές μεταβολής του αποθέματος άνθρακα σε χρονικό ορίζοντα 20 ετών. Συγκεκριμένα, η τιμή για τον συντελεστή χρήσης γης προκύπτει από τον Πίνακα 5.5 του IPCC για την κατηγορία *Perennial/Tree Crop* σε κλιματική ζώνη “*Warm Temperate-Dry*”. Επομένως, για τον ελαιώνα της περιοχής μελέτης, δηλαδή μια μακροχρόνια δενδρώδη καλλιέργεια σε μεσογειακές συνθήκες, η τιμή που λαμβάνεται ορίζεται ως:

$$F_{LU} = 0,72$$

Λόγω της διατήρησης της χρήσης γης, η μεταβλητή αυτή δεν διαφοροποιείται μεταξύ των δυο σεναρίων.

Βάσει του ορισμού της συμβατικής διαχείρισης που διαμορφώθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, η δεύτερη μεταβλητή περιλαμβάνει τον συντελεστή διαχείρισης και χαρακτηρίζεται από πλήρη κατεργασία εδάφους (*full tillage*). Η πλήρης κατεργασία αποτελεί βασική κατάσταση αναφοράς σύμφωνα με τον IPCC και η τιμή που προκύπτει από τον Πίνακα 5.5 είναι η παρακάτω:

$$F_{MG} = 1,00$$

Τέλος, όσον αφορά τις εισροές στη γεωργική διαδικασία, στο σενάριο αναφοράς η επιστροφή των φυτικών υπολειμμάτων είναι περιορισμένη, και παράλληλα δεν εφαρμόζονται συστηματική εφαρμογή των οργανικών εδαφοβελτιωτικών. Τα στοιχεία αυτά, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.5 του IPCC, οδηγούν στην επιλογή της κατηγορίας “*Low input*” για τη ζώνη “*Temperate-Dry*”, με τιμή:

$$F_I = 0,95$$

Συνοψίζοντας, στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που εφαρμόζονται στο συμβατικό σενάριο. Οι τιμές αυτές αντλούνται από τους αντίστοιχους πίνακες των Κατευθυντήριων Οδηγιών του IPCC (2006 και του 2019 Refinement και εφαρμόζονται συνεκτικά στο πλαίσιο της προσέγγισης Tier 1).

Πίνακας 4.2: Τιμές συντελεστών για το συμβατικό σενάριο σύμφωνα με τη μεθοδολογία του IPCC

Παράμετρος	Τιμή
SOC_{ref}	38 t C ha ⁻¹
F_{LU}	0,72
F_{MG}	1,00
F_I	0,95

Πηγή: Προσαρμογή από IPCC (2006 & 2019 Refinement)

4.4.2 Παραμετροποίηση αναγεννητικού σεναρίου (Regenerative)

Η διαφοροποίηση του αναγεννητικού σεναρίου έγκειται στις διαχειριστικές πρακτικές και στο επίπεδο οργανικών εισροών στο αγροτεμάχιο. Όσον αφορά τον συντελεστή διαχείρισης, και βάσει τον ορισμό του αναγεννητικού σεναρίου στην παρούσα ανάλυση, εφαρμόζεται η φυτοκάλυψη και περιορίζεται η κατεργασία του εδάφους σε μεγάλο βαθμό. Σύμφωνα με τον IPCC, οι πρακτικές αυτές αντιστοιχούν σε κατηγορία *Reduced tillage* ή/και *No-till* (βλ. Παράρτημα B2). Από τον Πίνακα 5.5 των Κατευθυντήριων Οδηγιών του IPCC προκύπτει ότι οι τιμές του συντελεστή διαχείρισης για τις πρακτικές αυτές είναι 1,02 για *Reduced tillage* και 1,10 για *No-till*.

Δεδομένου ότι το αναγεννητικό σύστημα του ελαιώνα περιλαμβάνει ουσιαστική μείωση της εδαφικής διατάραξης και διατήρηση επιφανειακής κάλυψης, η τιμή που λαμβάνει ο συντελεστής διαχείρισης σε αυτό το σενάριο παρουσιάζεται παρακάτω:

$$F_{MG} = 1,10$$

Ο δεύτερος συντελεστής που διαφοροποιείται από το πρώτο σενάριο, αφορά τις οργανικές εισροές. Στο παρόν σενάριο, υποθέτουμε αυξημένη επιστροφή οργανικής ύλης, μέσα από την εφαρμογή πρακτικών όπως η διατήρηση και ενσωμάτωση των κλαδεμάτων, ως εσωτερικός πόρος των δενδρώδων καλλιεργειών, τη χρήση φυτοκάλυψης και την εφαρμογή κομπόστ ή και κοπριάς. Ο συντελεστής σύμφωνα με τον IPCC, ανάλογα αν εφαρμόζεται κοπριά μαζί με την οργανική ύλη ή όχι, λαμβάνει τιμές 1,37 ή 1,04 αντίστοιχα. Δεδομένου ότι στο σενάριο αυτό εφαρμόζεται εισροή ζωικών λιπασμάτων, η τελική τιμή του συντελεστή είναι:

$$F_I = 1,37$$

Συνοψίζοντας, παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που εφαρμόζονται στο εναλλακτικό σενάριο:

Πίνακας 4.3: Τιμές συντελεστών για το αναγεννητικό σενάριο σύμφωνα με τη μεθοδολογία του IPCC

Παράμετρος	Τιμή
SOC_{ref}	38 t C ha ⁻¹
F_{LU}	0,72
F_{MG}	1,10
F_I	1,37

Πηγή: Προσαρμογή από IPCC (2006 & 2019 Refinement)

4.4.3 Υπολογισμός αποθεμάτων και μεταβολής SOC

Η εξίσωση που προτείνεται από τον IPCC (2019 Refinement, Volume 4 – AFOLU, Ch. 2 & 5) για *mineral soils* είναι:

$$SOC = SOC_{ref} \times F_{LU} \times F_{MG} \times F_I$$

Όπου όλες οι τιμές αναφέρονται σε βάθος 0-30 cm και περίοδο εξισορρόπησης 20 ετών.

Για το συμβατικό σενάριο προκύπτει ότι τα αποθέματα οργανικού άνθρακα είναι:

$$SOC_{baseline} = 38 \times 0,72 \times 1,00 \times 0,95$$

$$SOC_{baseline} = 25,99 \text{ t C ha}^{-1}$$

Για το αναγεννητικό σενάριο προκύπτει ότι τα αποθέματα οργανικού άνθρακα είναι:

$$SOC_{reg} = 38 \times 0,72 \times 1,10 \times 1,37$$

$$SOC_{regen} = 41,23 \text{ t C ha}^{-1}$$

Συμπερασματικά, η μεταβολή του αποθέματος υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ του αποθέματος που αντιστοιχεί στο αναγεννητικό σενάριο και του αντίστοιχου αποθέματος του συμβατικού σεναρίου.

$$\Delta SOC = SOC_{regen} - SOC_{baseline}$$

$$\Delta SOC = 41,23 \text{ t C ha}^{-1} - 25,99 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$\Delta SOC = 15,24 \text{ t C ha}^{-1}$$

Η μεταβολή αυτή είναι σε ορίζοντα 20 ετών, και αναγάγοντας το σε ετήσια, προκύπτει ως εξής:

$$\Delta SOC_{annual} = \frac{15,24}{20}$$

$$\Delta SOC_{annual} = 0,762 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$$

$$\Delta SOC_{annual} = 2,80 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$$

Το αποτέλεσμα αντανακλά προσεγγιστική εκτίμηση βάσει προεπιλεγμένων συντελεστών Tier 1 και όχι επιτόπιων μετρήσεων SOC. Ως εκ τούτου, η τιμή πρέπει να ερμηνεύεται ως δυνητικό δυναμικό δέσμευσης και όχι ως πραγματικά μετρημένη αποθήκευση.

4.5 Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Η εκτιμώμενη ετήσια αύξηση του αποθέματος οργανικού άνθρακα του εδάφους ($0,762 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), που προκύπτει από τη μετάβαση σε αναγεννητική διαχείριση ελαιώνα, εντάσσεται στο εύρος τιμών που αναφέρεται στη διεθνή βιβλιογραφία για μόνιμες δενδρώδεις καλλιέργειες υπό βελτιωμένες διαχειριστικές πρακτικές.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι εκτιμήσεις για τον ρυθμό δέσμευσης οργανικού άνθρακα σε γεωργικά συστήματα παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση, ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες πρακτικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Σύμφωνα με τη πρόσφατη μετα-ανάλυση των Villat & Nicolas (2024), η οποία εξέτασε 345 περιπτώσεις εφαρμογής αναγεννητικών πρακτικών σε αροτραίες και δενδρώδεις πολυετείς καλλιέργειες, διαπιστώθηκε ότι για τις μόνιμες καλλιέργειες ο μέσος ρυθμός δέσμευσης άνθρακα ανέρχεται σε $1,10 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Η τιμή που προέκυψε στην παρούσα εργασία είναι χαμηλότερη από τον μέσο όρο της συγκεκριμένης μετα-ανάλυσης, αλλά βρίσκεται εντός του εύρους τιμών που αναφέρονται για μεμονωμένες πρακτικές. Η διαφοροποίηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς στη μελέτη των Villat & Nicolas συχνά συνδυάζονται πολλαπλές παρεμβάσεις (cover crops, οργανικές εισροές, ενσωμάτωση ζώων), ενώ στο παρόν παράδειγμα εφαρμόζεται συγκεκριμένος συνδυασμός πρακτικών με βάση τους προεπιλεγμένους συντελεστές του IPCC. Επιπλέον, μια άλλη ανάλυση των West & Post (2002), η οποία βασίστηκε σε δεδομένα από 67 μακροχρόνια πειράματα παγκοσμίως, έδειξε ότι η μετάβαση από συμβατική κατεργασία σε συστήματα μηδενικής ή μειωμένης κατεργασίας μπορεί να αυξήσει το απόθεμα οργανικού άνθρακα κατά περίπου $0,57 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (West & Post, 2002). Μια ακόμη σχετικά πρόσφατη μελέτη των Lal et al. (2018), παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές δυναμικό δέσμευσης, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ $0,15$ και $0,75 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Επιπλέον, εκτιμάται ότι η περίοδος μέχρι την επίτευξη ισορροπίας των αποθεμάτων άνθρακα στο έδαφος εκτιμάται σε 25-50 χρόνια Lal et al. (2018).

Εστιάζοντας σε μεσογειακές συνθήκες, η βιβλιογραφία αναδεικνύει υψηλότερο και περισσότερο μεταβλητό δυναμικό δέσμευσης οργανικού άνθρακα σε δενδρώδεις καλλιέργειες. Συγκεκριμένα, η μετα-ανάλυση των Vicente-Vicente et al. (2016), η οποία επικεντρώνεται αποκλειστικά σε μεσογειακές δενδρώδεις καλλιέργειες (ελαιώνες, αμπελώνες, αμυγδαλεώνες), αναφέρει ιδιαίτερα υψηλούς ρυθμούς δέσμευσης άνθρακα, οι οποίοι κυμαίνονται κατά μέσο

όρο μεταξύ 0,7 και 4,5 t C ha⁻¹ yr⁻¹. Παρόμοια, η μελέτη των Aguilera et al. (2013), η οποία αφορούσε μεσογειακά συστήματα, έδειξε ότι η εφαρμογή συνδυαστικών πρακτικών, όπως η φυτοκάλυψη, η μηδενική κατεργασία και οι οργανικές εισροές, μπορεί να αυξήσει κατά 50% τα επίπεδα SOC, συγκριτικά με τις συμβατικές πρακτικές (Aguilera et al, 2013). Τέλος, οι Luján-Soto et al. (2021), μέσα από ανάλυση σε αμυγδαλεώνες της νοτιανατολικής Ισπανίας με μεσογειακό ξηρό κλίμα, συμπέραναν ότι, μεταξύ των διαφόρων συνδυαστικών πρακτικών που μελετούσαν, ο πιο αποδοτικός ήταν εκείνος που περιλάμβανε τη μηδενική κατεργασία, τη μόνιμη φυτοκάλυψη και την εφαρμογή οργανικών εισροών (Luján-Soto et al., 2021). Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι οι υψηλότεροι ρυθμοί παρατηρούνται κατά τα πρώτα έτη μετά την αλλαγή διαχείρισης και μειώνονται σταδιακά καθώς το σύστημα τείνει προς μια νέα ισορροπία. Το εύρος αυτό υποδηλώνει ότι οι δενδρώδεις καλλιέργειες της Μεσογείου παρουσιάζουν σημαντικό δυναμικό δέσμευσης άνθρακα, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζονται συνδυαστικές πρακτικές οργανικής ενίσχυσης και μειωμένης κατεργασίας.

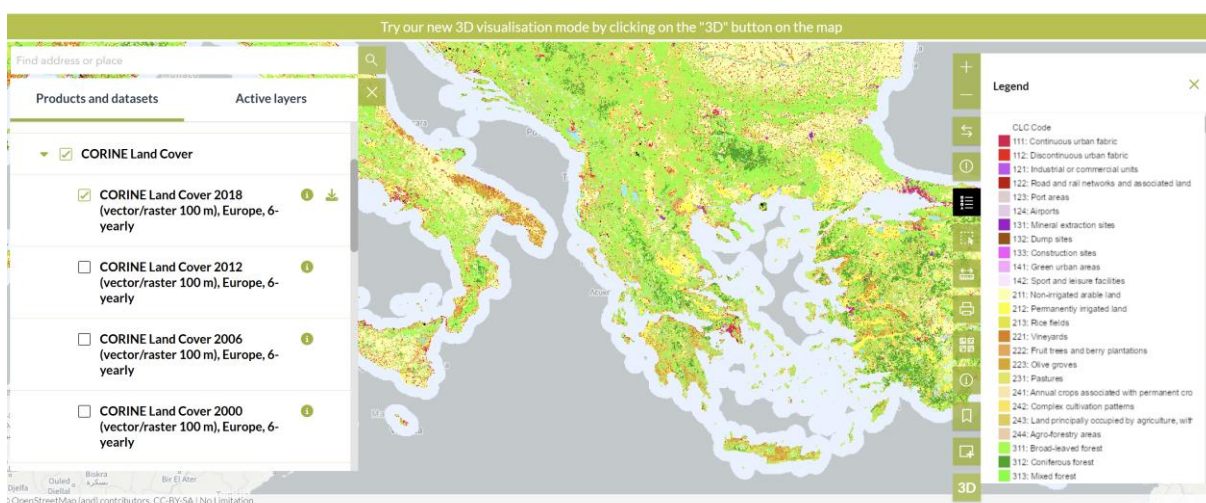
Τέλος, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη ότι η παρούσα ανάλυση εφαρμόζει προεπιλεγμένες τιμές του IPCC (Tier 1). Οι συντελεστές SOC_{ref}, F_{LU}, F_{MG} και F_I αποτελούν γενικευμένες παραμέτρους ευρείας κλίμακας και δεν προκύπτουν από επιτόπιες μετρήσεις ή εθνικούς συντελεστές. Κατά συνέπεια, η εκτιμώμενη μεταβολή της δέσμευσης άνθρακα αποτυπώνει κυρίως την τάξη μεγέθους της αναμενόμενης επίδρασης από την αλλαγή διαχείρισης και όχι μια ακριβή, τοπικά επαληθευμένη τιμή. Επιπλέον, επειδή το τελικό απόθεμα SOC προκύπτει από το γινόμενο πολλών παραμέτρων, η αβεβαιότητα κάθε επιμέρους συντελεστή μεταφέρεται στο συνολικό αποτέλεσμα. Τέλος, η ετήσια τιμή εκφράζει μέση μεταβολή σε ορίζοντα 20 ετών, ενώ στη βιβλιογραφία οι ρυθμοί δέσμευσης συχνά εμφανίζουν φθίνουσα πορεία με την πάροδο του χρόνου, καθώς το έδαφος προσεγγίζει νέα ισορροπία.

4.6 Εκτίμηση εθνικού δυναμικού δέσμευσης οργανικού άνθρακα με βάση χωρική ετερογένεια

Στο πλαίσιο επέκτασης της ανάλυσης πέρα από την αρχική περιοχή μελέτης, διερευνάται η εκτίμηση του εύρους δυναμικού δέσμευσης οργανικού άνθρακα στο έδαφος (SOC) για τις ελαιοκαλλιέργειες σε εθνική κλίμακα. Η προσέγγιση αυτή λαμβάνει υπόψη την χωρική ετερογένεια της Ελλάδας, καθώς και την επιρροή της στην τελική δυναμική δέσμευσης των εδαφών. Η προσέγγιση βασίζεται στην χρήση γεωχωρικών δεδομένων και εργαλείων όπως το CORINE Land Cover της ΕΕ και το λογισμικό QGIS. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα CORINE

χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της κατηγορίας χρήσεων γης της περιοχής μελέτης, ενώ το QGIS αξιοποιήθηκε για την εξεπεργασία, οπτικοποίηση και χωρική ανάλυση των δεδομένων.

Για την εκτίμηση του εύρους, σε πρώτο στάδιο, η ανάλυση επικεντρώθηκε στον εντοπισμό αντιπροσωπευτικών περιοχών με ελαιώνες. Ο συνδυασμός χρήσης των στοιχείων από την βάση δεδομένων του CORINE Land Cover της ΕΕ (Σχήμα 15) και η αποτύπωση τους με το εργαλείο QGIS, συνέβαλε στην δημιουργία ενός χάρτη που αποτυπώνει μόνο ελαιώνες στον ελλαδικό χώρο (Σχήμα 16).



Σχήμα 15. Χάρτης Κάλυψης Γης βάσει δεδομένων CORINE Land Cover 2018 (CLC 2018). Με καφέ χρώμα απεικονίζονται οι εκτάσεις ελαιώνων (CORINE class: Olive groves).

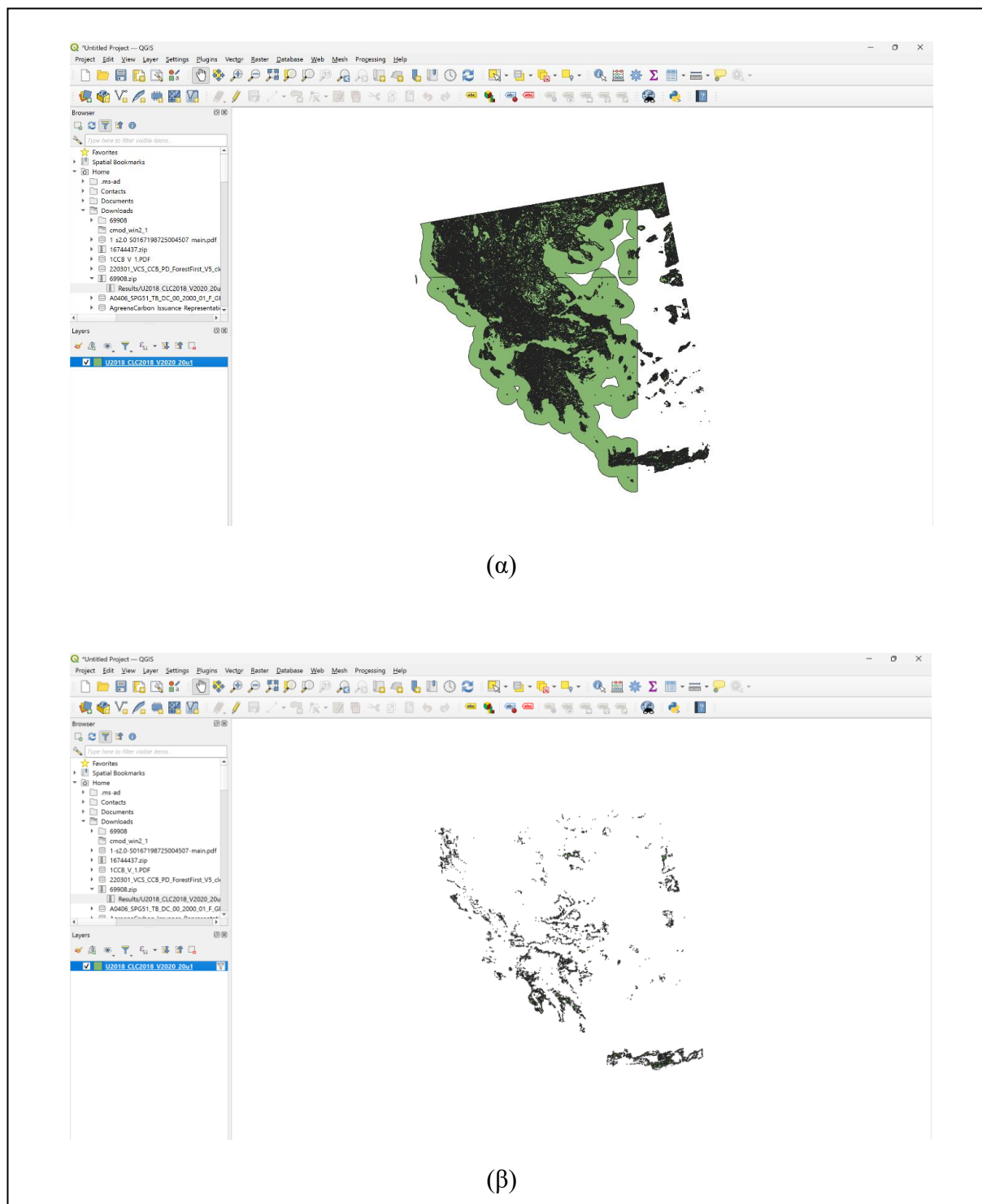
Πηγή: Copernicus Land Monitoring Service (CLC 2018) διαθέσιμο στο:

<https://land.copernicus.eu/en/map-viewer>

Με βάση τους χάρτες, επιλέχθηκαν τέσσερις αντιπροσωπευτικές περιοχές με ελαιώνες: η Μεσσηνία (Νοτιοδυτική Πελοπόννησος), η Λακωνία (Νοτιοανατολική Πελοπόννησος), η Κρήτη και η Λέσβος (Βόρειο Αιγαίο). Οι περιοχές αυτές επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτουν διαφορετικές εδαφοκλιματικές συνθήκες.

Στη συνέχεια, προσδιορίστηκαν τα επίπεδα αναφοράς SOC με βάση τα δεδομένα του ESDAC - Διεθνής Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας, τα οποία ενσωματώθηκαν στους υπολογισμούς σύμφωνα με την μεθοδολογία IPCC, δηλαδή στις εξισώσεις (1 & 2). Τέλος, υπολογίστηκαν οι τιμές SOC για δύο σενάρια διαχείρισης: συμβατικό και αναγεννητικό, ώστε να προκύψει η καθαρή διαφορά των επιπέδων εδαφικού άνθρακα μεταξύ των σεναρίων.

Ακολουθεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας για τα τέσσερα αντιπροσωπευτικά γεωγραφικά σημεία.



Σχήμα 16. (α) Αποτύπωση δεδομένων στο QGIS και (β) Εφαρμογή φίλτρου για εμφάνιση ελαιώνων.

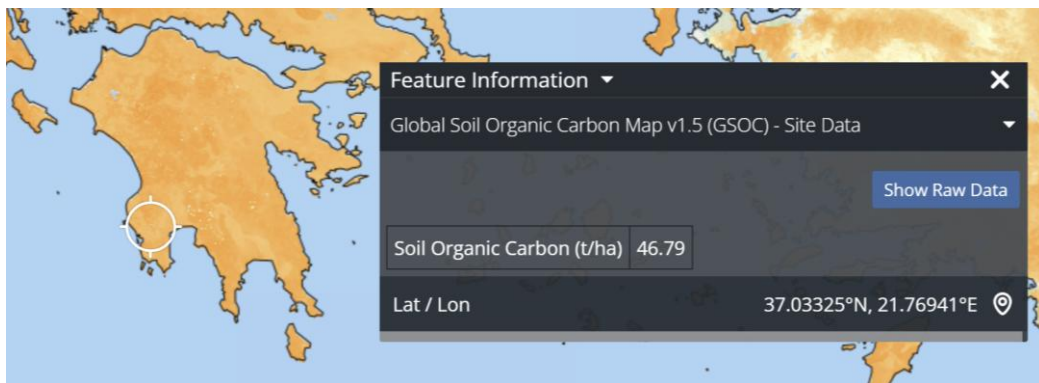
Αρχικά, για την περιοχή της Μεσσηνίας, με βάση τις τιμές από το GSOC map (ESDAC), εφαρμόστηκε η εξίσωση (1) για τα δυο σενάρια διαχείρισης.

$$SOC_{baseline} = 46,79 \times 0,72 \times 1,00 \times 0,95 = 32,00 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$SOC_{reg} = 46,79 \times 0,72 \times 1,10 \times 1,37 = 50,76 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$\Delta SOC = 18,76 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$\Delta SOC_{annual} = 0,938 \text{ t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$$



Σχήμα 17. Αποθέματα οργανικού άνθρακα στο έδαφος στην περιοχή της Μεσσηνίας.

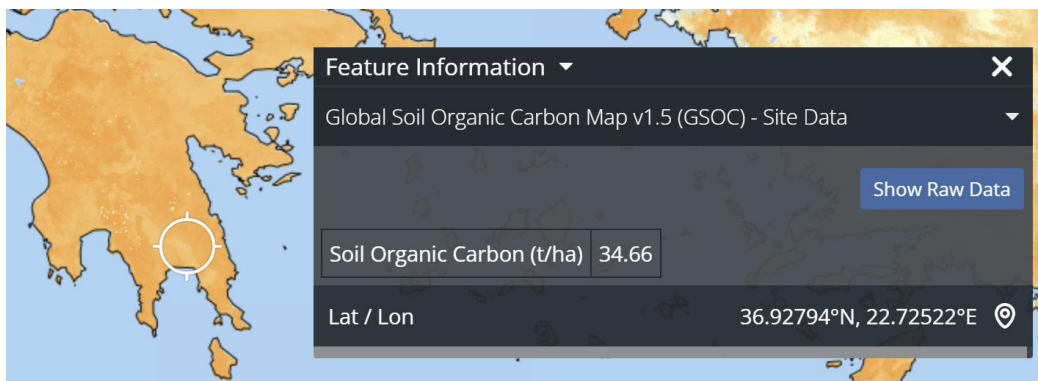
Έπειτα, για την περιοχή της Λακωνίας, με αντίστοιχο τρόπο, οι εξισώσεις είναι οι εξής:

$$SOC_{baseline} = 34,66 \times 0,72 \times 1,00 \times 0,95 = 23,70 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$SOC_{reg} = 34,66 \times 0,72 \times 1,10 \times 1,37 = 37,60 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$\Delta SOC = 13,90 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$\Delta SOC_{annual} = 0,695 \text{ t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$$



Σχήμα 18. Αποθέματα οργανικού άνθρακα στο έδαφος στην περιοχή της Λακωνίας.

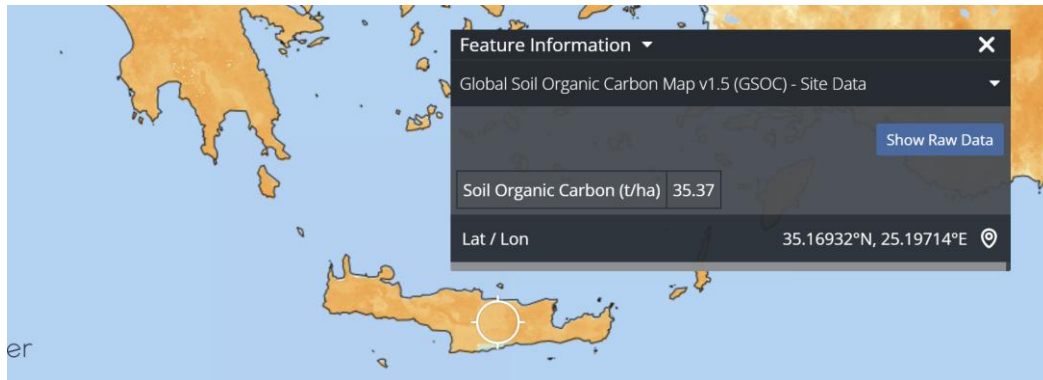
Στην συνέχεια, για την Κρήτη, αντίστοιχα:

$$SOC_{baseline} = 35,37 \times 0,72 \times 1,00 \times 0,95 = 24,19 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$SOC_{reg} = 35,37 \times 0,72 \times 1,10 \times 1,37 = 38,37 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$\Delta SOC = 14,18 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$\Delta SOC_{annual} = 0,709 \text{ t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$$



Σχήμα 19. Αποθέματα οργανικού άνθρακα στο έδαφος στην περιοχή της Κρήτης.

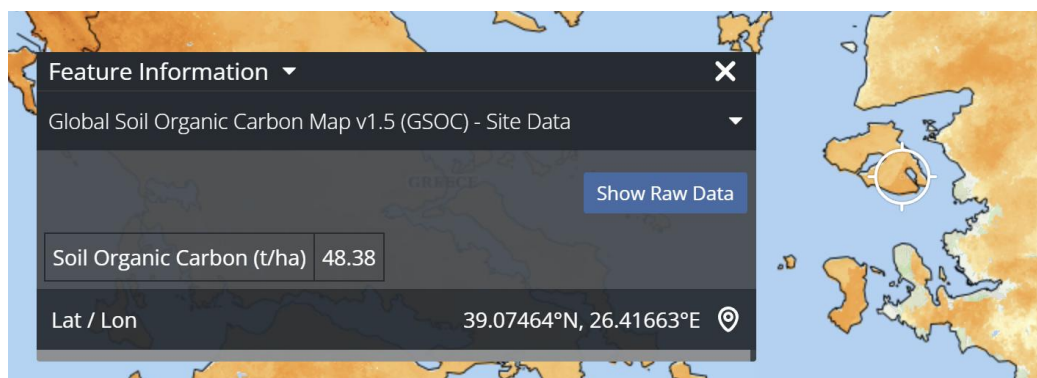
Τέλος, για την Λέσβο:

$$SOC_{baseline} = 48,38 \times 0,72 \times 1,00 \times 0,95 = 33,09 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$SOC_{reg} = 48,38 \times 0,72 \times 1,10 \times 1,37 = 52,49 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$\Delta SOC = 19,40 \text{ t C ha}^{-1}$$

$$\Delta SOC_{annual} = 0,970 \text{ t C ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$$



Σχήμα 20. Αποθέματα οργανικού άνθρακα στο έδαφος στην περιοχή της Λέσβος.

Ταξινομώντας τις ετήσιες μεταβολές SOC (ΔSOC_{annual}) σε αύξουσα σειρά προκύπτει:

$$0,695 < 0,709 < 0,938 < 0,970 \text{ t C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$$

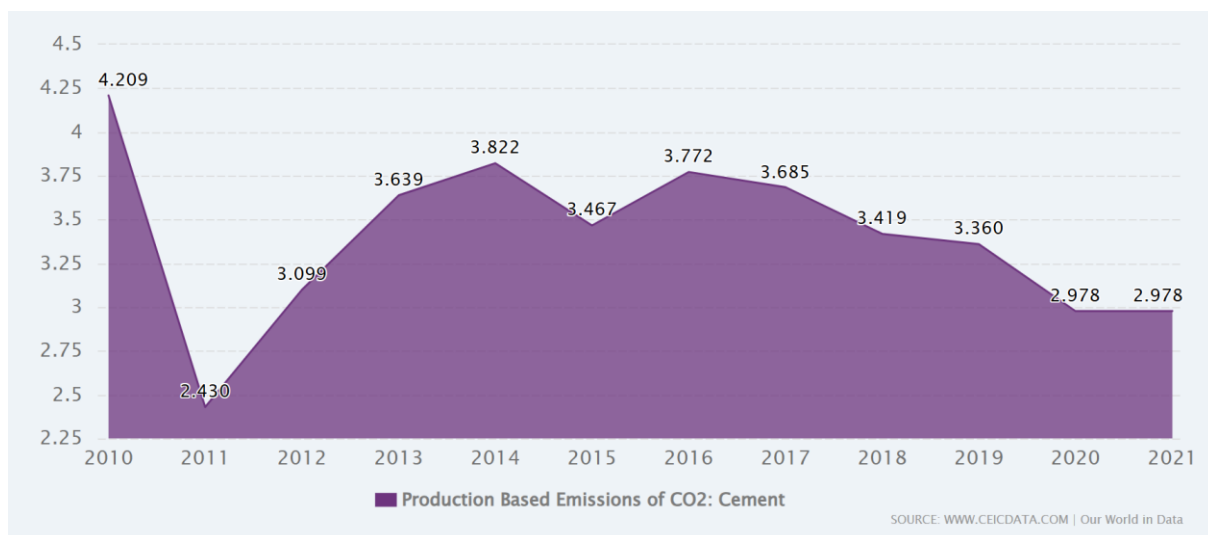
Συνεπώς, το εύρος τιμών του καθαρού δυναμικού δέσμευσης εδαφικού οργανικού άνθρακα για τις ελληνικές ελαιοκαλλιέργειες, που προκύπτει από τη μετάβαση από συμβατική σε αναγεννητική διαχείριση, εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 0,695 έως 0,970 $\text{t C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$. Η διακύμανση αυτή αντανακλά τη χωρική διαφοροποίηση των εδαφοκλιματικών συνθηκών, υποδεικνύοντας ότι το δυναμικό δέσμευσης SOC δεν είναι ομοιογενές στον ελλαδικό χώρο, πόσο μάλλον σε παγκόσμια κλίμακα.

Αναγάγοντας το αποτέλεσμα σε εθνικό επίπεδο, σύμφωνα με την Απογραφή Γεωργίας το 2020 (ΕΛΣΤΑΤ) οι συνολικές εκτάσεις ελαιώνων, είτε για ελαιοποίηση είτε για επιτραπέζια χρήση, είναι περίπου 5,84 εκατομμύρια στρέμματα ή 584.000 εκτάρια. Επόμενως, λαμβάνοντας υπόψη την μικρότερη ($0,695 \text{ t C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$) και μεγαλύτερη ($0,970 \text{ t C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$) τιμή του εύρους, το συνολικό δυναμικό δέσμευσης άνθρακα που προκύπτει έπειτα από τον πολλαπλασιασμό με τις εκτάσεις, εκτιμάται μεταξύ 406.000 και 566.000 τόνους C ετησίως. Η εκτίμηση αυτή αναφέρεται στο θεωρητικό δυναμικό που θα μπορούσε να επιτευχθεί στο σύνολο των υφιστάμενων ελαιώνων της χώρας, υπό την προϋπόθεση ευρείας εφαρμογής πρακτικών αναγεννητικής γεωργίας αντί των συμβατικών συστημάτων διαχείρισης.

Προκειμένου να καταστεί εφικτή η κατανόηση της αξίας της επίδρασης των αναγεννητικών πρακτικών σε ελαιώνες, στο πλαίσιο της ανάλυσης, πραγματοποιείται μια σύγκριση με τις εκπομπές CO_2 από την τσιμεντοβιομηχανία στην Ελλάδα. Αναλυτικότερα, οι εκπομπές της βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου κατά μέσο όρο από το 2010-2021 είναι περίπου 3,4 Mt CO_2 /έτος (Σχήμα 21) (CEIC Data). Για τις ανάγκες της σύγκρισης, μετατρέπεται και το δυναμικό δέσμευσης της τάξης των 406.000 – 566.000 τόνων C σε ισοδύναμο περίπου 1,5–2,1 Mt CO_2 /έτος, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (8). Το μέγεθος αυτό είναι αρκετά σημαντικό, καθώς αντιστοιχεί περίπου στο 45-60% των ετήσιων εκπομπών CO_2 από την τσιμεντοβιομηχανία στην Ελλάδα, λαμβάνοντας υπόψη τον μέσο όρο. Η σύγκριση αυτή αναδεικνύει με σαφή τρόπο το δυναμικό των ελαιώνων ως μηχανισμού δέσμευσης άνθρακα σε εθνικό επίπεδο, ενισχύοντας την ευρεία υιοθέτηση των πρακτικών αναγεννητικής γεωργίας.

Οι τιμές αυτές υποδεικνύουν ένα σημαντικό δυναμικό δέσμευσης οργανικού άνθρακα σε εθνικό επίπεδο, αναδεικνύοντας τον ρόλο των ελαιώνων ως βασικών αγροοικοσυστημάτων για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής. Το εκτιμώμενο εύρος καταδεικνύει ότι, υπό κατάλλες

διαχειριστικές παρεμβάσεις, η συμβολή του τομέα μπορεί να είναι ουσιαστική σε επίπεδο εθνικού ισοζυγίου άνθρακα.



Σχήμα 21. Εκπομπές CO₂ από την παραγωγή τσιμέντου στην Ελλάδα για την περίοδο 2010-2021 (σε εκατομμύρια τόνους CO₂ - Mt CO₂)

Πηγή: CEIC Data. *Production-based emissions of CO₂: Cement (Greece).*

<https://www.ceicdata.com/en/greece/environmental-co2-and-greenhouse-gas-emissions-annual/production-based-emissions-of-co2-cement>

Παράλληλα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση βασίζεται σε τέσσερις αντιπροσωπευτικές περιοχές, ενώ η διαφοροποίηση ως προς εδαφικά, κλιματικά και διαχειριστικά χαρακτηριστικά των ελαιώνων είναι σημαντική στην Ελλάδα. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα θα πρέπει να ερμηνεύονται ως εκτίμηση της τάξης μεγέθους του φαινομένου, χωρίς ωστόσο να αναιρείται η σημασία τους ως ένδειξη του συνολικού δυναμικού.

Κεφάλαιο 5^ο Δυνατότητα ένταξης στην εθελοντική αγορά πιστώσεων άνθρακα

Η επιβάρυνση του αγροτικού τομέα επιφέρει αρνητικές συνέπειες στην ποιότητα του εδάφους, στη βιοποικιλότητα, στη σταθερότητα του εδάφους και, εν τέλει στην αποτύπωση του πρωτογενούς τομέα ως σημαντικής πηγής εκπομπών που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή (Lal, 2004;FAO, 2017).

Στο πλαίσιο μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, η υιοθέτηση πιο βιώσιμων και αναγεννητικών πρακτικών στον αγροτικό τομέα αναγνωρίζεται διεθνώς ως ένα υποσχόμενο εργαλείο με υψηλές δυνατότες (Smith et al., 2020). Τις δυνατότητες αυτές προωθεί ένα πρόγραμμα εθελοντικής αγοράς άνθρακα (*Voluntary Carbon Market – VCM*), το οποίο κινητοποιεί τους παραγωγούς να αυξήσουν το δυναμικό δέσμευσης άνθρακα στα αγροτεμάχια τους, μέσω της οικονομικής ενίσχυσης (World Bank, 2023).

Κάθε τόνος άνθρακα που δεσμεύεται ή αποφεύγεται από την εφαρμογή αναγεννητικών πρακτικών, πιστοποιείται από οργανισμούς και μετατρέπεται σε πιστώσεις που διατίθενται στην αγορά. Βασική προϋπόθεση ένταξης αγροτικών έργων στην εθελοντική αγορά άνθρακα αποτελεί η τήρηση των κριτηρίων ποιότητας, όπως η προσθετικότητα, η μονιμότητα, η ποσοτικοποίηση, η ανεξάρτηση επαλήθευση, η αποφυγή διπλής καταμέτρησης και η διαφάνεια. Τα κριτήρια αυτά αποτελούν βασικούς πυλώνες σε όλους τους οργανισμούς πιστοποίησης (Griscom et al., 2017; IPCC, 2019).

5.1 Μονάδες πιστώσεων άνθρακα

Οι μονάδες πιστώσεων άνθρακα αποτελούν πιστοποιημένες μονάδες μείωσης ή απορρόφησης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, όπου κάθε μονάδα αντιστοιχεί σε έναν τόνο ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (1 t CO_{2e}) (Schneider et al., 2019). Στον αγροτικό τομέα, η δράση μετριασμού αφορά κυρίως την αποθήκευση οργανικού άνθρακα στο έδαφος. Αυτό είναι εφικτό, μέσω της μακροχρόνιας εφαρμογής αναγεννητικών πρακτικών (Paustian et al., 2016).

Όπως συνέβη και στην παραπάνω ανάλυση, ο υπολογισμός της διαφοράς των αποθεμάτων οργανικού άνθρακα πριν και μετά την εφαρμογή των αναγεννητικών πρακτικών, απαιτεί τη σύγκριση ενός σεναρίου αναφοράς (baseline scenario) που αποτυπώνει τις πρακτικές που εφαρμόζονταν πριν και ενός σεναρίου έργου στο οποίο έχουν εφαρμοστεί αναγεννητικές πρακτικές (project scenario) (IPCC, 2006 & 2019 Refinement). Η διαφορά που προκύπτει

αποτελεί την καθαρή ποσότητα δέσμευσης άνθρακα, η οποία, αφού πιστοποιηθεί, αντιστοιχεί σε δυνητικές μονάδες άνθρακα.

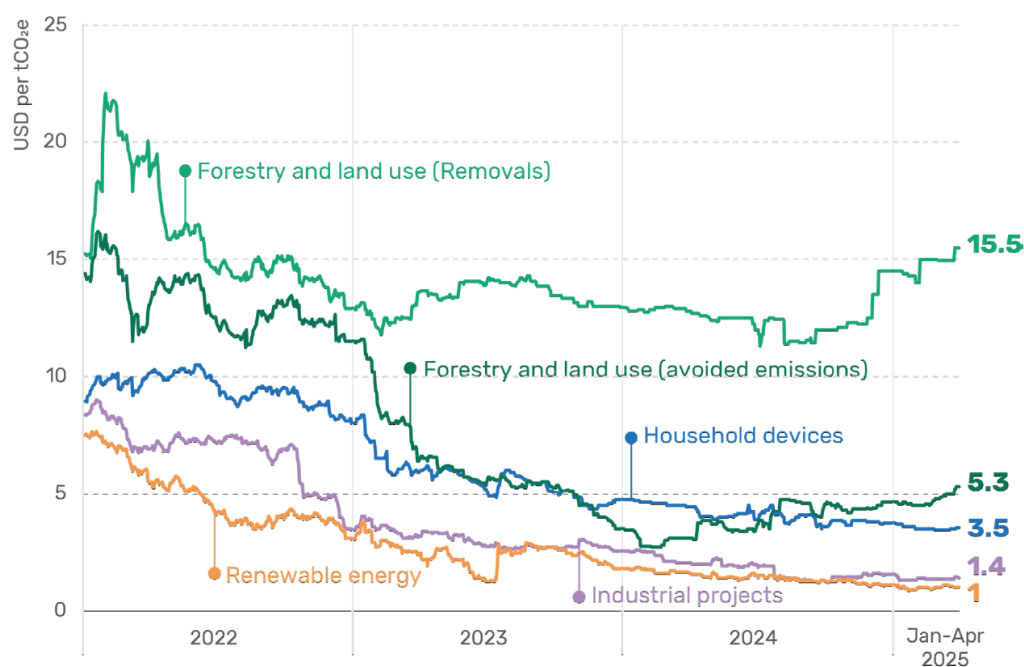
5.2 Τιμολόγηση άνθρακα

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, η εκτιμώμενη δέσμευση οργανικού άνθρακα ανέρχεται σε $0,762 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ή διαφορετικά σε $2,8 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, έπειτα από μετατροπή σε ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα, δεδομένου ότι ένας τόνος άνθρακα αντιστοιχεί σε 3,67 τόνους CO_2 .

Στο πλαίσιο της εθελοντικής αγοράς πιστώσεων άνθρακα, κάθε τόνος ισοδύναμου CO_2 αντιστοιχεί σε μία μονάδα πιστώσεων άνθρακα. Επομένως, η εκτιμώμενη δέσμευση άνθρακα του ελαιώνα θα μπορούσε θεωρητικά να αντιστοιχεί σε περίπου 2,8 δυνητικές μονάδες πιστώσεων άνθρακα ανά εκτάριο ετησίως, υπό την προϋπόθεση ότι πληρούνται τα κριτήρια πιστοποίησης και επαλήθευσης που απαιτούνται από τα πρότυπα *carbon projects*.

Με βάση τις τρέχουσες τιμές της εθελοντικής αγοράς πιστώσεων άνθρακα, η δέσμευση που προκύπτει από την αλλαγή στις πρακτικές αποκτά μια οικονομική υπόσταση, και αποτελεί ένα επιπλέον οικονομικό κίνητρο για τους παραγωγούς. Ωστόσο, οι τιμές των πιστώσεων άνθρακα στην εθελοντική αγορά παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα ανάλογα με τον τύπο του έργου και την ποιότητα της πιστοποίησης. Βάσει των τρέχουσων συνθηκών, τα έργα που βασίζονται σε φυσικές λύσεις (*nature-based removals*), τα οποία περιλαμβάνουν δράσεις δέσμευσης άνθρακα στη χρήση γης και στα αγροοικοσυστήματα, εμφανίζουν υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες έργων, όπως για παράδειγμα έργα που σχετίζονται με τις οικιακές συσκευές (*Household devices*), ή έργα που βασίζονται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (*Renewable energy*) (Σχήμα 22). Οι πιστώσεις για την κατηγορία των φυσικών λύσεων (*nature-based removals*), διαπραγματεύονται περίπου μεταξύ 15-25 \$ ανά τόνο CO_2e , γεγονός που μεταφράζεται σε ένα πρόσθετο εισόδημα της τάξης των 42-70 \$ ανά εκτάριο ετησίως. Αυτό σημαίνει ότι για την συνολική έκταση των 40 εκταρίων της συγκεκριμένης εκμετάλλευσης, το πρόσθετο οικονομικό κίνητρο κυμαίνεται μεταξύ των 1.680 με 2.800 δολάρια ανά έτος. Αν και το ποσό δεν αποτελεί από μόνο του σημαντική πηγή εισοδήματος για τον παραγωγό, μπορεί να λειτουργήσει ως συμπληρωματικό οικονομικό κίνητρο για την υιοθέτηση πρακτικών που ενισχύουν τη δέσμευση άνθρακα και βελτιώνουν την υγεία του εδάφους (S&P Global, 2025).

Παράλληλα, οι παγκόσμιοι οργανισμοί πιστοποίησης παρουσιάζουν νέες μεθοδολογίες πιστοποίησης που αφορούν τις συγκεκριμένες πρακτικές, όπως η VM002 της Verra⁵ και το πρωτόκολλο *US Soil Enrichment* της *Climate Action Reserve*, γεγονότα που καταδεικνύουν τη δυναμική ανάπτυξης της συγκεκριμένης αγοράς.



Σχήμα 22. Τιμές πιστώσεων άνθρακα ⁶(carbon credits) ανά τύπο έργου στην εθελοντική αγορά άνθρακα για την περίοδο 2022–2025.

Πηγή: World Bank Group, 2025

Μέχρι τις αρχές του 2025, περισσότερα από 200 έργα *soil carbon* είχαν αναπτυχθεί παγκοσμίως, με περίπου 1,5 εκατομμύρια πιστώσεις άνθρακα να έχουν εκδοθεί. Ωστόσο, η προσφορά τέτοιων πιστώσεων παραμένει περιορισμένη, γεγονός που αντανάκλα το πρώιμο στάδιο ανάπτυξης των σχετικών έργων *carbon farming* (Fastmarkets, 2025; World Bank Group, 2025).

⁵ Verra: Διεθνής οργανισμός που αναπτύσσει και διαχειρίζεται πρότυπα πιστοποίησης για έργα μείωσης ή απορρόφησης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Το πιο διαδεδομένο πρότυπο του οργανισμού είναι το **Verified Carbon Standard (VCS)**, μέσω του οποίου πιστοποιούνται έργα κλιματικής δράσης και εκδίδονται πιστώσεις άνθρακα που μπορούν να διατεθούν στην εθελοντική αγορά άνθρακα.

⁶ Οι τιμές βασίζονται σε μηνιαίους και ετήσιους μέσους όρους των εκτιμήσεων τιμών της Platts (S&P Global Commodity Insights, 2025), οι οποίες παρέχονται από την S&P Global.

5.3 Πρόσφατες εξελίξεις στην τιμολόγηση άνθρακα και στις αγορές πιστώσεων άνθρακα (2024-2025)

Σύμφωνα με την έκθεση της Παγκόσμιας Τράπεζας *State and Trends of Carbon Pricing 2025*, που δημοσιεύτηκε τον Ιούνιο του 2025, παρουσιάζονται στοιχεία για τα έσοδα από την τιμολόγηση άνθρακα που ξεπερνούν τα 100 δισεκατομμύρια δολάρια το 2024. Το μισό περίπου των εσόδων επενδύθηκαν σε περιβαλλοντικά έργα και υποδομές, αξιοποιώντας τις μονάδες άνθρακα για την μετάβαση προς την πράσινη οικονομία. Παράλληλα, στην έκθεση αναγνωρίζεται η ζήτηση για έργα αφαίρεσης άνθρακα (*carbon removals*) από έργα βασισμένα στη φύση (*nature-based projects*) καθώς συνεχίζουν να έχουν υψηλές τιμές, αντανakλώντας την αύξημένη προτίμηση της αγοράς για μακροχρόνιες λύσεις δέσμευσης άνθρακα (*World Bank's State and Trends of Carbon Pricing, 2025*).

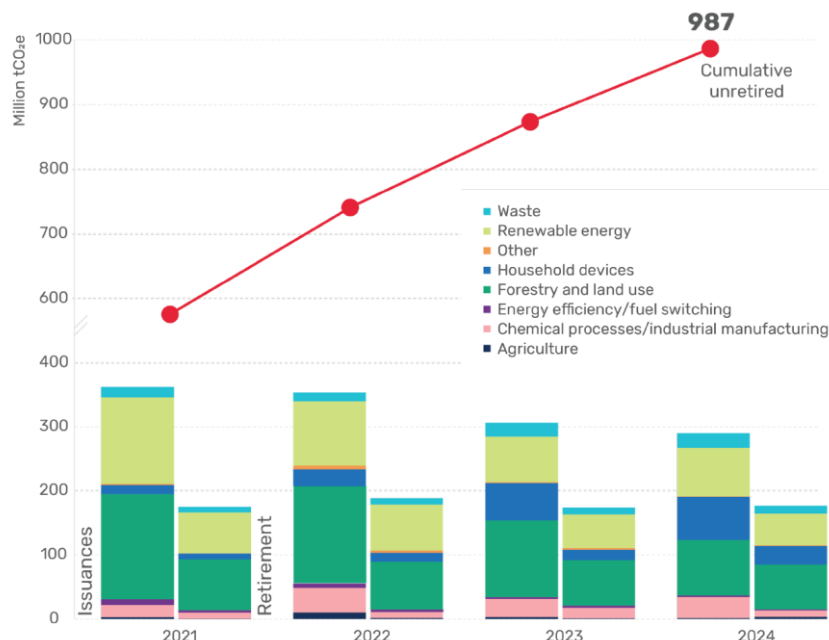
Η ζήτηση των πιστώσεων άνθρακα παρέμεινε σχετικά σταθερή για την περίοδο 2021-2024. Συγκεκριμένα, η εξέλιξη των αποσύρσεων (*retirements*) – δηλαδή η οριστική χρήση των πιστώσεων από εταιρείες ή οργανισμούς για την αντιστάθμιση των εκπομπών τους, μετά την οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν- και των εκδόσεων (*issuances*) – δηλαδή η δημιουργία νέων πιστώσεων άνθρακα από έργα μείωσης ή απομάκρυνσης εκπομπών- αποτυπώνονται πιο ολοκληρωμένα στο Σχήμα 23. Από το σχήμα παρατηρείται ότι, παρά την συνεχόμενη αύξηση των εκδόσεων, η αποσύρσεις δεν ακολουθούν τον ίδιο ρυθμό, με αποτέλεσμα ο συσσωρευτικός όγκος των μη αποσυρμένων πιστώσεων να αυξάνεται εκθετικά προσεγγίζοντας τα 987 MtCO_{2e} το 2024. Η εξέλιξη αυτή διαμορφώνει μια εικόνα όπου η προσφορά υπερβαίνει την ζήτηση, οδηγώντας την αγορά σε μια μετάβαση από ποσοτική επέκταση σε ποιοτική αναβάθμιση (*World Bank's State and Trends of Carbon Pricing, 2025*).

Από τα δεδομένα που παρουσιάζει ο MSCI⁷, η αγορά εξακολουθεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από έργα αποφυγής εκπομπών, όπως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και έργα REDD+⁸, τα οποία αντιστοιχούν στο 58% των συνολικών αποσύρσεων πιστώσεων το 2024, καθώς είναι στο υψηλότερο σημείο από το 2020 (Σχήμα 24).

⁷ Ο MSCI (Morgan Stanley Capital International) είναι διεθνής οργανισμός παροχής χρηματοοικονομικών δεικτών, δεδομένων και αναλύσεων, ο οποίος προσφέρει, μεταξύ άλλων, έρευνα και αξιολογήσεις σχετικά με ζητήματα περιβάλλοντος, κοινωνίας και εταιρικής διακυβέρνησης (ESG), καθώς και αναλύσεις για τις αγορές άνθρακα.

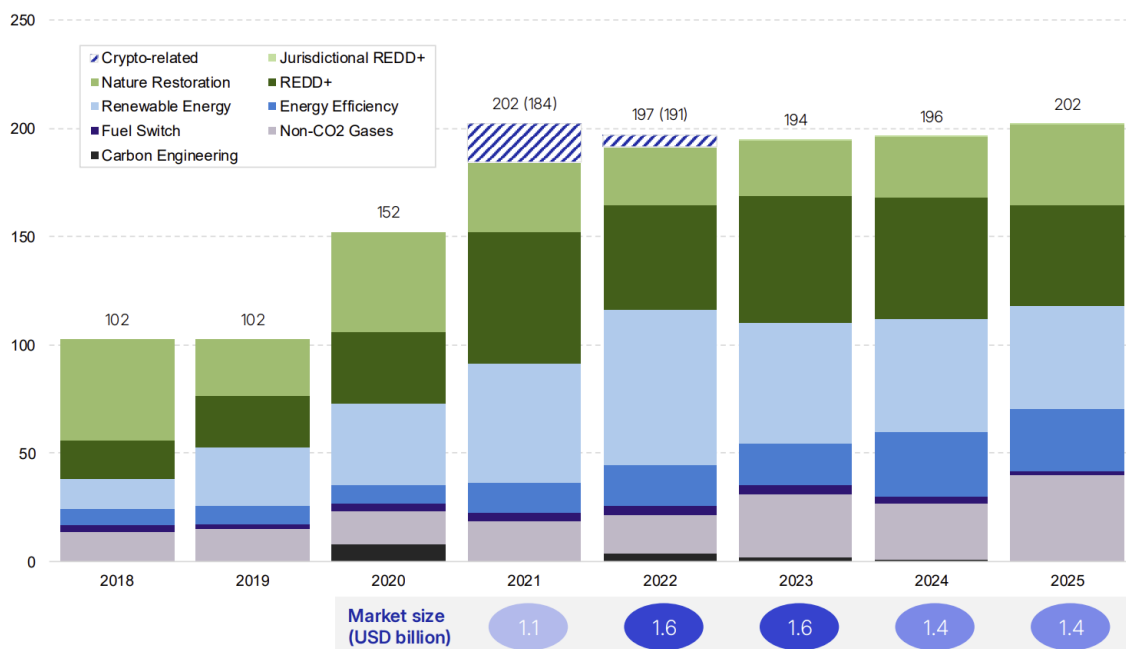
⁸ REDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation): διεθνής μηχανισμός στο πλαίσιο της UNFCCC που αποσκοπεί στη μείωση των εκπομπών μέσω της προστασίας, βιώσιμης διαχείρισης και ενίσχυσης των δασικών αποθεμάτων άνθρακα.

Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση του MSCI το 2025, η συνολική ζήτηση αυξήθηκε κατά 3% συγκριτικά με το 2024. Ωστόσο, τα έργα βασισμένα στη φύση σημειώνουν σημαντική αύξηση στην ζήτηση.



Σχήμα 23. Ετήσιες εκδόσεις και αποσύρσεις ανά είδος έργου (MtCO_{2e})

Πηγή: World Bank's State and Trends of Carbon Pricing, 2025



Σχήμα 24. Ετήσια ζήτηση ανά είδος έργου (MtCO_{2e})

Πηγή: MSCI, 2025

5.4 Κριτήρια αξιοπιστίας

Η πιστοποίηση μιας μονάδας πίστωσης άνθρακα και η διάθεση της στην αγορά, προϋποθέτει την θετική αξιολόγηση ως προς τα σημαντικά κριτήρια ποιότητας. Διεθνείς οργανισμοί όπως ο MSCI και ο Carbon Credit Quality Initiative - CCQI έχουν δημοσιεύσει αντίστοιχα πλαίσια αξιολόγησης που αφορούν τα κριτήρια που διαμορφώνουν την ποιότητα και την αξιοπιστία των carbon credits. Σε μεγάλο βαθμό τα κριτήρια αυτά ταυτίζονται, δίνοντας έμφαση σε έξι βασικά κριτήρια:

1. Προσθετικότητα (Additionality)
2. Μονιμότητα (Permanence)
3. Ποσοτικοποίηση (Quantification)
4. Ανεξάρτηση επαλήθευση (Independent verification)
5. Αποφυγή διπλής καταμέτρησης (No double-counting)
6. Διαφάνεια (Transparency)

Η αξιοπιστία των πιστώσεων άνθρακα βασίζεται στην ύπαρξη ενός συστήματος μέτρησης, αναφοράς και επαλήθευσης (*Measurement, Reporting and Verification – MRV*), το οποίο διασφαλίζει την ορθή καταγραφή των μειώσεων ή απορροφήσεων. Στον πρωτογενή τομέα, το σύστημα αυτό περιλαμβάνει επιτόπιες μετρήσεις, δειγματοληψίες, δεδομένα από δορυφορικά συστήματα ή από συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (Unmanned Aerial Vehicles - UAV), προκειμένου να τεκμηριωθούν τα αποτελέσματα των εφαρμοζόμενων αναγεννητικών πρακτικών (Paustian et al., 2016; Smith et al., 2020).

Για την περίπτωση του ελαιώνα σε πιλοτικό στάδιο, ένα δυνητικό σύστημα παρακολούθησης και επαλήθευσης θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη χρήση δορυφορικών δεδομένων και δεδομένων από συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών και βιβλιογραφικών αναφορών, μειώνοντας την ανάγκη υλοποίησης δειγματοληψιών και διατηρώντας την αξιοπιστία της εκτίμησης (World Bank, 2023). Στο πλαίσιο αυτό, η ποιότητα των πιστώσεων άνθρακα αξιολογείται βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, τα σημαντικότερα από τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

5.4.1 Προσθετικότητα

Η προσθετικότητα αποτελεί ίσως το βασικότερο κριτήριο αξιοπιστίας των πιστώσεων άνθρακα, καθώς αποδεικνύει ότι δεν θα εφαρμόζονταν οι αναγεννητικές πρακτικές εάν δεν υπήρχε το κίνητρο των πιστώσεων άνθρακα. Ουσιαστικά, επιβεβαιώνει ότι οι παραγωγοί δεν θα είχαν

κανένα, κυρίως οικονομικό, κίνητρο να αντικαταστήσουν τις συμβατικές πρακτικές διαχείρισης με τις αναγεννητικές πρακτικές (BeZero Carbon, 2026).

Στον αγροτικό τομέα, η προσθετικότητα βασίζεται κυρίως στη σύγκριση μεταξύ του σεναρίου αναφοράς, στο οποίο δεν εφαρμόζονταν οι αναγεννητικές πρακτικές, και του σεναρίου έργου (Schneider et al., 2019). Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις πραγματοποιείται και ανάλυση κοινής πρακτικής (*common practice analysis*), η οποία εξετάζει σε ποιο βαθμό οι πρακτικές της αναγεννητικής γεωργίας εφαρμόζονται ήδη στην περιοχή πρακτικές (BeZero Carbon, 2026).

5.4.2 Μονιμότητα και κίνδυνος αντιστροφής

Το τρίτο κριτήριο αξιοπιστίας σχετίζεται με την μονιμότητα των αποθηκευμένων ποσοτήτων άνθρακα. Στην περίπτωση του πρωτογενούς τομέα, η μονιμότητα αποτελεί πρόκληση λόγω της ευαισθησίας του εδάφους σε αλλαγές, όπως οι ακραίες καιρικές συνθήκες ή διαταραχές του εδάφους, καθώς και αλλαγές στη διαχείριση του, οι οποίες μπορούν να αντιστρέψουν τη δέσμευση του οργανικού άνθρακα (Paustian et al., 2016; Griscom et al., 2017). Επομένως, το έργο θα πρέπει να αντιμετωπίσει τον κίνδυνο αντιστροφής εφαρμόζοντας ορισμένες προϋποθέσεις. Η πρώτη προϋπόθεση αφορά την πολυετή συνεργασία των παραγωγών και τη δέσμευση τους να εφαρμόζουν σωστά τις αναγεννητικές πρακτικές. Η δεύτερη αφορά τη χρήση συντηρητικών παραδοχών κατά τον υπολογισμό των πιστοποιήσιμων μονάδων άνθρακα. Τέλος, την πρόβλεψη μηχανισμών διαχείρισης κινδύνου μέσα από την ύπαρξη αποθεματικών, δηλαδή της παρακράτησης ενός μικρού ποσοστού της καθαρής διαφοράς μεταξύ των απορροφήσεων της συμβατικής και της αναγεννητικής διαχείρισης πρακτικές (BeZero Carbon, 2026).

5.4.3 Ποσοτικοποίηση

Η ποσοτικοποίηση των μειώσεων ή απορροφήσεων των εκπομπών CO₂ θα πρέπει να υπολογίζεται με συντηρητική προσέγγιση, ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος της υπερεκτίμησης των εκδιδόμενων πιστώσεων (*over-crediting*). Ο όγκος πιστώσεων που μπορεί να εκδώσει ένα έργο προκύπτει από την διαφορά μεταξύ των μειώσεων που προκαλούνται από το έργο και από τις μειώσεις που θα συνέβαιναν χωρίς την υλοποίηση του έργου. Επιπλέον, δίνεται σημαντική έμφαση στον ορθό υπολογισμό του σεναρίου βάσης, καθώς η υποεκτίμηση του θα μπορούσε να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της επίδρασης του έργου (MSCI). Εκτός από τα παραπάνω,

αξιολογείται και η εφαρμοζόμενη μεθοδολογία, καθώς όσο πιο αναγνωρισμένη είναι, τόσο πιο αποδεκτό είναι το αποτέλεσμα.

5.4.4 Ανεξάρτητη επαλήθευση

Η ανεξάρτητη επαλήθευση είναι μια διαδικασία όπου ένας τρίτος φορέας ελέγχει και επιβεβαιώνει τα δεδομένα του έργου όσον αφορά τα κριτήρια ποιότητας. Επίσης ελέγχει την εφαρμοζόμενη μεθοδολογία και παρακολουθεί το σύστημα μέτρησης, αναφοράς και επαλήθευσης (*Measurement, Reporting and Verification – MRV*). Αφού ο φορέας είναι σύμφωνος και εγκρίνει τα δεδομένα του έργου, τότε πιστοποιεί ότι οι εκδοθείσες πιστώσεις είναι έγκυρες (ICVCM's Core Carbon Principles).

5.4.5 Αποφυγή διπλής καταμέτρησης

Η αποφυγή της διπλής καταμέτρησης αποτελεί βασικό στοιχείο για την αξιοπιστία των πιστώσεων άνθρακα. Σύμφωνα με τον CCQI, υπάρχουν τρεις μορφές διπλής καταμέτρησης. Πρώτον, η διπλή έκδοση τους όπου συμβαίνει όταν εκδίδονται περισσότερα από ένα *carbon credit* για την ίδια μείωση ή απορρόφηση εκπομπών (διπλή καταχώριση). Δεύτερη μορφή είναι η διπλή χρήση, όπου η ίδια μονάδα πίστωσης χρησιμοποιείται περισσότερες από μια φορές για την επίτευξη ενός κλιματικού στόχου. Τέλος είναι η διπλή διεκδίκηση, όπου η ίδια μείωση ή απορρόφηση εκπομπών δηλώνεται από περισσότερες από μία χώρες, περιοχές ή οργανισμούς για την επίτευξη κλιματικών στόχων.

5.4.6 Διαφάνεια

Η διαφάνεια αποτελεί θεμελιώδη αρχή για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ακεραιότητας των πιστώσεων άνθρακα. Αφορά τη σαφή, πλήρη και προσβάσιμη δημοσιοποίηση πληροφοριών σχετικά με τα δεδομένα του έργου. Η ενίσχυση της διαφάνειας συμβάλλει στην αποφυγή φαινομένων όπως το *greenwashing*, ενώ επιτρέπει στους επενδυτές και στους αγοραστές πιστώσεων να αξιολογούν την ποιότητα και την αξιοπιστία των έργων (ICVCM's Core Carbon Principles).

5.5 Δράσεις δέσμευσης άνθρακα στον αγροτικό τομέα της Ευρώπης

Η αναγεννητική γεωργία αποτελεί ένα ευρύτερο αγροοικολογικό πλαίσιο βελτίωσης του εδάφους, εντός του οποίου οι πρακτικές που οδηγούν σε αύξηση των αποθεμάτων οργανικού άνθρακα, μπορούν να ενταχθούν σε σχήματα γεωργίας δέσμευσης άνθρακα (*carbon farming*). Η ΕΕ δίνει όλο και μεγαλύτερη προσοχή στην έννοια της γεωργίας δέσμευσης άνθρακα,

προκειμένου να την αξιοποιήσει ως ένα βασικό εργαλείο για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 (European Commission, 2019). Παρόμοια με την αναγεννητική γεωργία, η γεωργία δέσμευσης άνθρακα στοχεύει σε γεωργικές και δασικές πρακτικές που καθιστούν εφικτή τη δέσμευση άνθρακα στο έδαφος, συμβάλλοντας σε καλύτερα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά αποτελέσματα (EC, 2021).

Στο πλαίσιο αυτό, το 2022 προτάθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή η ανάπτυξη ενός ενιαίου συστήματος πιστοποίησης αφαιρέσεων/απορροφήσεων άνθρακα μέσω του EU Carbon Removal Certification Framework (CRCF). Στόχος του πλαισίου είναι η θέσπιση ενός κοινού συνόλου κανόνων και κριτηρίων για την πιστοποίηση αξιόπιστων, ποσοτικοποιημένων και επαληθεύσιμων αφαιρέσεων άνθρακα εντός της ΕΕ (European Commission, 2022).

Το EU CRCF αναγνωρίζει τέσσερις βασικές αρχές, γνωστές και ως Q.U.A.L.T.Y κριτήρια. Πρώτον, την ποσοτικοποίηση των αφαιρέσεων άνθρακα και αυτό εστιάζει στην ακριβή και επιστημονικά ορθή εκτίμηση τους. Δεύτερον, το στοιχείο της προσθετικότητας, όπου διασφαλίζει ότι οι αφαιρέσεις δεν θα πραγματοποιούνταν χωρίς την υλοποίηση του έργου. Τρίτον, τη μακροχρόνια αποθήκευση των αφαιρέσεων, και τέλος, τη βιωσιμότητα, ώστε οι πρακτικές να μην προκαλούν αρνητικές περιβαλλοντικές ή κοινωνικές επιπτώσεις (European Commission, 2022).

Οι πρακτικές που συμπίπτουν μεταξύ της αναγεννητικής γεωργίας και της γεωργίας δέσμευσης άνθρακα είναι κυρίως η μόνιμη χορτοκάλυψη, η μειωμένη κατεργασία του εδάφους, οι οργανικές εισροές και η αγροδασοπονία (EC, 2021; Smith et al., 2020). Οι πρακτικές αυτές θεωρούνται ιδιαίτερα εφαρμόσιμες σε μεσογειακά αγροοικοσυστήματα, όπου η αποκατάσταση της οργανικής ουσίας του εδάφους αποτελεί ένα καίριο ζήτημα.

Συμπερασματικά, το ευρωπαϊκό πλαίσιο βρίσκεται σε διαδικασία αναδιαμόρφωσης και ανακατεύθυνσης των μέσων επίτευξης της κλιματικής ουδετερότητας. Η ανάπτυξη του EU CRCF αποτελεί ένα σημαντικό πρώτο βήμα που δημιουργεί προοπτικές ένταξης αγροτικών εκμεταλλεύσεων σε σχήματα πιστοποίησης άνθρακα. Ωστόσο, το υψηλό κόστος των συστημάτων MRV και η πολυπλοκότητα των διαδικασιών πιστοποίησης συχνά επιβαρύνουν τους παραγωγούς. Επιπλέον, η διαμόρφωση της τιμής μέσω των μηχανισμών της αγοράς ενισχύει την αβεβαιότητα και τον επενδυτικό κίνδυνο για τους συμμετέχοντες.

Κεφάλαιο 6^ο Συμπεράσματα

Ο ρόλος της γεωργίας στην αντιμετώπιση και στον περιορισμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής είναι διττός. Από την μία πλευρά, μπορεί να περιορίσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που συνδέονται με τις γεωργικές δραστηριότητες, ενώ από την άλλη πλευρά, μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην ενίσχυση του δυναμικού δέσμευσης άνθρακα στο έδαφος. Ωστόσο, η δέσμευση του άνθρακα συμβαίνει με έναν μειούμενο ρυθμό, καθώς εν τέλει επιτυγχάνεται το στάδιο του κορεσμού.

Σε μια προσπάθεια υιοθέτησης πιο βιώσιμων πρακτικών γεωργίας, εξετάζεται η προσέγγιση της αναγεννητικής γεωργίας. Αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης αγροτικών οικοσυστημάτων, όπου στοχεύει στην ολιστική αποκατάσταση της υγείας του εδάφους, στην ενίσχυση της βιοποικιλότητας και της ανθεκτικότητας των αγροτικών συστημάτων. Το μοντέλο αξιοποιεί τις φυσικές διεργασίες, όπως τη φωτοσύνθεση, την αλληλεπίδραση των φυτών και των μικροοργανισμών του εδάφους με σκοπό να αυξήσει την οργανική ουσία και να βελτιώσει την εδαφική δομή. Ωστόσο, δεν επικεντρώνεται αποκλειστικά στη λειτουργία του εδάφους, αλλά εξασφαλίζει καλύτερη ποιότητα τροφίμων για την κοινωνία και διατηρεί την απόδοση της παραγωγικότητας στο επιθυμητό ρυθμό για τους παραγωγούς.

Η παρούσα εργασία επιδίωξε να παρουσιάσει τα οφέλη της αναγεννητικής γεωργίας, εφαρμόζοντας τις πρακτικές και τις αρχές της. Ορίζοντας ως μελέτη περίπτωσης έναν ελαιώνα στην Πελοπόννησο, επιχειρήθηκε να ποσοτικοποιηθεί η μεταβολή της δέσμευσης άνθρακα στο έδαφος υιοθετώντας αναγεννητικές πρακτικές. Μέσα από τη χρήση της μεθοδολογίας του IPCC – Tier 1, η διαφορά στα αποθέματα οργανικού άνθρακα ήταν θετική, με τιμή $2,8 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, ενώ βιβλιογραφικά η μέση τιμή δέσμευσης άνθρακα κυμαίνεται στο $3,7 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Η διαφορά αυτή, παρόλο που είναι μικρή, βασίζεται στις διαφορετικές συνθήκες του περιβάλλοντος μεταξύ των αναλύσεων, στην ακρίβεια των υπολογισμών και στην εφαρμογή διαφορετικών συνδυασμών αναγεννητικών πρακτικών.

Δεδομένου ότι οι δενδρώδεις καλλιέργειες, συμπεριλαμβανομένων και των ελαιώνων, στην Ελλάδα αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό ποσοστό της καλλιεργήσιμης γης με ποσοστό 27%, σύμφωνα με την ΕΛΣΤΑΤ, αποτελεί ένα αξιοποιήσιμο εργαλείο μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από τους αρμόδιους φορείς, και μέσω της υλοποίησης προγραμμάτων ενημέρωσης και ευαισθητοποίησης να κινητοποιήσουν τους παραγωγούς προς μια πιο βιώσιμη διαχείριση των καλλιεργειών. Σημαντικό κίνητρο προς

αυτήν την κατεύθυνση αποτελεί η οικονομική ενίσχυση από τη δημιουργία πιστώσεων άνθρακα, έπειτα από την αξιολόγηση βάσει των προαπαιτούμενων κριτηρίων.

Συμπεραίνοντας, η αναγεννητική γεωργία και οι πρακτικές και αρχές που προσβέει, αποτελούν μια εναλλακτική διαχείριση των καλλιεργειών, δίνοντας έμφαση στη μακροχρόνια υγεία του οικοσυστήματος και στην αξιοποίηση της γεωργικής βιοποικιλότητας. Η αποτελεσματικότητά της προϋποθέτει την προσεκτική αξιολόγηση συνθηκών όπως οι κλιματολογικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, τη δομή της αγροτικής εκμετάλλευσης, τις συνθήκες της αγοράς και τις επιλογές του παραγωγού (Khangura et al., 2023).

Παρά τις προκλήσεις που υφίσταται, λόγω της ελλιπούς τεκμηρίωσης των αποτελεσμάτων με μελέτες και μετρήσεις, καθώς και λόγω της περιορισμένης ενημέρωσης των παραγωγών, το αγροτικό μοντέλο αυτό αναγνωρίζεται ως μια σημαντική ανεκμετάλλευτη πηγή δέσμευσης άνθρακα. Προσφέρει νέες προοπτικές στον αγροτικό τομέα που μπορούν να συμβάλλουν στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και στην επίτευξη των στόχων για το 2050.

Σε εθνικό επίπεδο, η παρούσα μελέτη αποτελεί μια από τις λίγες προσπάθειες εκτίμησης του δυναμικού δέσμευσης οργανικού άνθρακα σε ελαιώνες. Η μελέτη βασίστηκε στη μεθοδολογία του IPCC – Tier 1, λόγω έλλειψης εδαφικών μετρήσεων και αναλύσεων, ωστόσο μελλοντικές έρευνες μπορούν να μειώσουν την αβεβαιότητα των εκτιμήσεων μέσα από την εφαρμογή μεθοδολογικών Tier 2 ή Tier 3. Η συγκέντρωση δεδομένων και μετρήσεων θα διευκολύνει τη δυνατότητα ανάπτυξης “*carbon farming projects*” στον ελληνικό αγροτικό τομέα, καθώς μια εμπειριστατωμένη τεκμηρίωση θα συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση του ρόλου της γεωργίας στη δέσμευση άνθρακα.

Οι εθελοντικές αγορές άνθρακα θεωρούνται ένα σημαντικό εργαλείο για την προσέλκυση ιδιωτικών επενδύσεων μεγάλης κλίμακας στη γεωργία άνθρακα, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκής ζήτηση για πιστώσεις άνθρακα. Τα έργα που εντάσσονται σε αυτό το σύνολο ακολουθούν συγκεκριμένες, τυποποιημένες μεθοδολογίες, ενώ η αξιοπιστία τους βασίζεται σε μηχανισμούς παρακούθησης και επαλήθευσης.

Ξένη βιβλιογραφία

1. ADEME. (2013). Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030–2050. Paris: The French Agency for Ecological Transition.
2. Aguilera, E., Lassaletta, L., Gattinger, A., & Gimeno, B. S. (2013). Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: A meta-analysis. *Agriculture, ecosystems & environment*, 168, 25-36.
3. Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision.
4. Baudron F and Giller KE (2014) Agriculture and nature: Trouble and Strife? *Biological Conservation* 170: 232–245.
5. Bardgett, R. D., Freeman, C., & Ostle, N. J. (2008). Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedback. *The ISME journal*, 2(8), 805-814.
6. Baveye PC, Berthelin J, Tessier D, et al. (2018) The “4 per 1000” initiative: a credibility issue for the soil science community? *Geoderma* 309: 118–123
7. Bebbber, D. P., Ramotowski, M. A., & Gurr, S. J. (2013). Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature climate change*, 3(11), 985-988.
8. BeZero Carbon. (2026, February 6). *The BeZero Carbon methodology assessment framework*.
<https://bezerocarbon.com/insights/the-bezero-carbon-methodology-assessment-framework>
9. Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1527-1576.
10. Carbon Credit Quality Initiative (CCQI). (n.d.). *Carbon Credit Quality Initiative*.
<https://carboncreditquality.org/>
11. CEIC Data. Production-based emissions of CO₂: Cement (Greece).
12. Chivenge PP, Murwira HK, Giller KE, et al. (2007) Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: implications for conservation agriculture on contrasting soils. *Soil & Tillage Research* 94: 328–337
13. Corbeels, M., Marchão, R. L., Neto, M. S., Ferreira, E. G., Madari, B. E., Scopel, E., & Brito, O. R. (2016). Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. *Scientific reports*, 6(1), 21450.
14. Cruz Colazo, J., de Dios Herrero, J., Sager, R., Guzmán, M. L., & Zaman, M. (2022). Contribution of integrated crop livestock systems to climate smart agriculture in Argentina. *Land*, 11(11), 2060.
15. De Los Rios, J., Poyda, A., Reinsch, T., Kluß, C., Taube, F., & Loges, R. (2022). Integrating crop-livestock system practices in forage and grain-based rotations in northern Germany: Potentials for soil carbon sequestration. *Agronomy*, 12(2), 338.
16. European Commission (2019). The European Green Deal
17. European Commission (2021). Carbon farming – A new business model for farmers.
18. European Commission (2022). Proposal for a Regulation establishing a Union certification framework for carbon removals (COM2022)
19. European Economic and Social Committee (2025). Opinion of the European Economic and Social Committee – Regenerative agriculture as a target towards enhancing sustainable food production, supporting climate and biodiversity objectives (C/2025/4207).
<https://data.europa.eu/eli/C/2025/4207/oj>
20. EU CAP Network. (2024). EU CAP Network focus group on regenerative agriculture and soil health. European Commission.

https://eu-cap-network.ec.europa.eu/publications/eu-cap-network-focus-group-regenerative-agriculture-soil-health_en

21. Eurostat. SDG 13 – Climate action. European Commission.
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/SDG_13 - Climate action](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/SDG_13_-_Climate_action)
22. European Environment Agency (EEA). *Copernicus Land Monitoring Service*
<https://land.copernicus.eu/en/map-viewer>
23. European Soil Data Centre (ESDAC), esdac.jrc.ec.europa.eu, European Commission, Joint Research Centre
24. FAO (2017). Soil Organic Carbon: the hidden potential.
25. Feliciano D, Ledo A, Hillier J, et al. (2018) Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 254: 117–129.
26. Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nat. Rev. Microbiol.* 15, 579–590. doi: 10.1038/nrmicro.2017.87
27. Fornes, F., Lidón, A., Belda, R.M., Macan, G.P.F., Cayuela, M.L., Sánchez-García, M. and Sánchez-Monedero, M.A., 2024. Soil fertility and plant nutrition in an organic olive orchard after 5 years of amendment with compost, biochar or their blend. *Scientific Reports*, 14, 16606.
28. Francis, C. A., Harwood, R. R., & Parr, J. F. (1986). The potential for regenerative agriculture in the developing world. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1(2), 65-74
29. Gao B, Huang T, Ju X, et al. (2018) Chinese cropping systems are a net source of greenhouse gases despite soil carbon sequestration. *Global Change Biology* 24: 5590–5606.
30. Ghimire, S., Wang, J., & Fleck, J. R. (2021). Integrated crop-livestock systems for nitrogen management: A multi-scale spatial analysis. *Animals*, 11(1), 100.
31. Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A., & Sumberg, J. (2021). Regenerative agriculture: an agronomic perspective. *Outlook on agriculture*, 50(1), 13-25.
32. Griscom et al. (2017). Natural climate solutions. *PNAS*.
33. Johnston AE, Poulton PR and Coleman K (2009) Chapter 1 - soil organic matter: its importance in sustainable agriculture and carbon dioxide fluxes. In: Sparks DL (ed) *Advances in Agronomy*. Cambridge, MA: Academic Press, pp. 1–57.
34. Jones, D. L., Nguyen, C., & Finlay, R. D. (2009). Carbon flow in the rhizosphere: Carbon trading at the soil–root interface. *Plant and Soil*, 321(1–2), 5–33.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-009-9925-0>
35. IPCC – Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (GPG-LULUCF) (2003)
36. IPCC, 2022. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
37. Integrity Council for the Voluntary Carbon Market (ICVCM). (2023). *Core Carbon Principles*. <https://icvcm.org/core-carbon-principles/>
38. Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES). IPCC (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines.
39. IPCC – Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). Table 4.3
40. International Institute for Sustainable Development (IISD). (2018, May 22). *Saving our soils: Carbon sequestration, sustainability and the Sustainable Development Goals*.

<https://sdg.iisd.org/commentary/generation-2030/saving-our-soils-carbon-sequestration-sustainability-and-the-sdgs/>

41. Karhu, K., Auffret, M. D., Dungait, J. A. J., Hopkins, D. W., Prosser, J. I., Singh, B. K., Subke, J.-A., Wookey, P. A., Ågren, G. I., Sebastià, M.-T., Gouriveau, F., Bergkvist, G., Meir, P., Nottingham, A. T., Salinas, N., & Hartley, I. P. (2014). Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response. *Nature*, 513, 81–84.

<https://doi.org/10.1038/nature13604>

42. Kelly, S. (2020). Regenerative agriculture – criticisms and concerns. DeSmog. <https://www.desmog.com/2020/09/11/regenerative-agriculture-criticisms-and-concerns/>

43. Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative agriculture—A literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. *Sustainability*, 15(3), 2338.

44. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*.

45. Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. *Sustainability*, 7(5), 5875–5895.

<https://doi.org/10.3390/su7055875>

46. Lal, R., Smith, P., Jungkunst, H. F., Mitsch, W. J., Lehmann, J., Nair, P. K. R., McBratney, A. B., de Moraes Sá, J. C., Schneider, J., Zinn, Y. L., Skorupa, A. L. A., Zhang, H. L., Minasny, B., Srinivasrao, C., & Ravindranath, N. H. (2018). The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 73(6), 145A–152A.

<https://doi.org/10.2489/jswc.73.6.145A>

47. MSCI. (2026, January 14). *2025 global carbon credit market: Year in review* [Presentation slides]. MSCI.

<https://www.msci.com/downloads/web/msci-com/discover-msci/events/event-assets/2026/january/-msci-2025-carbon-markets-year-in-review/2025%20Carbon%20Markets%20Year%20in%20Review%20Slides.pdf>

48. Lobell, D. B., Bänziger, M., Magorokosho, C., & Vivek, B. (2011). Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nature climate change*, 1(1), 42–45.

49. Lundström, U. S., van Breemen, N., & Bain, D. (2000). The podzolization process: A review. *Geoderma*, 94, 91–107. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00036-1)

50. Luján-Soto, R. L., Martínez-Mena, M., Cuéllar-Padilla, M., de Vente, J., & López-Vicente, M. (2021). *Restoring soil quality of woody agroecosystems in Mediterranean drylands through regenerative agricultural practices*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 306, 107–191.

51. McCauley, K., & Barlow, K. (2023). Regenerative agriculture: increasing plant diversity and soil carbon sequestration on agricultural landscapes. *Surg J* 15 (1)

52. Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., ... & Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59–86

53. MSCI. (n.d.). *MSCI – Bringing clarity to investment decisions*.

<https://www.msci.com/>

54. O'donoghue, T., Minasny, B., & McBratney, A. (2022). Regenerative agriculture and its potential to improve farm scape function. *Sustainability*, 14(10), 5815.

55. Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., & Hanson, C. E. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working*

Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

56. Paustian et al. (2016). Climate-smart soils. *Nature*
57. Ranjan, A. R., Pandey, S. R., & Singh, N. (2023). Enhancing Indian Mustard Production through Integrated Nutrient Management. *Journal of Diversity Studies*.
<https://doi.org/10.51470/JOD, 2.>
58. Ravindranath, N. H., & Ostwald, M. (2008) – Carbon Inventory Methods: Handbook for Greenhouse Gas Inventory, Carbon Mitigation and Roundwood Production Projects (Springer)
59. Ravindranath NH, Ostwald M (2008) Methods for estimating above-ground biomass. In N. H. Ravindranath, and M. Ostwald, Carbon Inventory Methods
60. Reeves D (1997) The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research* 43: 131–167
61. Regeneration International. (2017). What is regenerative agriculture? Available at:
<https://regenerationinternational.org/wp-content/uploads/2017/02/Regen-Ag-Definition-2.23.17-1.pdf> (Accessed April 14, 2021)
62. Regreener. (2025, April 29). *Voluntary carbon market – Latest prices and developments*. Regreener.
<https://www.regreener.earth/blog/voluntary-carbon-market-update>
63. Rehberger, E., West, P. C., Spillane, C., & McKeown, P. C. (2023). What climate and environmental benefits of regenerative agriculture practices? An evidence review. *Environmental Research Communications*, 5, 052001.
<https://doi.org/10.1088/2515-7620/acd6dc>
64. Rhodes, C. J. (2017). The imperative for regenerative agriculture. *Science progress*, 100(1), 80-129
65. Rodale Institute. Regenerative organic agriculture.
<https://rodaleinstitute.org/why-organic/organic-basics/regenerative-organic-agriculture>
66. Roberts, C., Gholson, D., Locke, M., Simpson, Z., Quintana-Ashwell, N., Spencer, G. D., Pires, S., Pieralisi, B., Crow, W., & Krutz, L. J. (2026). Reduced tillage and cover crop effects on soil moisture and infiltration. *Agricultural Water Management*, 325, 110108.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.110108>
67. Sampson, R. N. (1982). Saving agricultural land: environmental issue of the 1980's. *Environmentalist*, 2(4), 321-332 & Rodale, R. (1983). Breaking new ground: The search for a sustainable agriculture. *Futurist*, 17(1), 15-20.
68. Schreefel, L.; Schulte, R.P.O.; de Boer, I.J.M.; Schrijver, A.P.; van Zanten, H.H.E. Regenerative Agriculture—The Soil Is the Base. *Glob. Food Secur.* 2020, 26, 100404.
69. Sinitambirivoutin, M., Milne, E., Schiettecatte, L. S., Tzamtzis, I., Dionisio, D., Henry, M., & Bernoux, M. (2024). An updated IPCC major soil types map derived from the harmonized world soil database v2. 0. *Catena*, 244, 108258.
70. Six J, Conant RT, Paul EA, et al. (2002) Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241: 155–176.
71. Soares, S. D. C., Fernández-Soler, C., Carrillo-López, E., & Martínez-Mena, M. (2025). Soil organic matter fractions in the topsoil and subsoil of woody crop systems: Impact of reduced tillage plus cover crops under rainfed semi-arid Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 393, 109821
72. Panettieri, M., Moreno, B., de Sosa, L. L., Benítez, E., & Madejón, E. (2022). Soil management and compost amendment are the main drivers of carbon sequestration in rainfed

olive trees agroecosystems: An evaluation of chemical and biological markers. *Catena*, 214, 106258. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106258>

73. Parry, M. L. (Ed.). (2007). Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4). Cambridge University Press.

74. Prajapati, H. A., Yada, K., Hanamasagar, Y., Kumar, M. B., Khan, T., Belagalla, N., & Malathi, G. (2024). Impact of climate change on global agriculture: Challenges and adaptation. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(4), 372-379.

75. Poelplau, C. & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200: 33–41.

76. Porter, J. R., & Semenov, M. A. (2005). Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1463), 2021-2035.

77. Poore, J., Nemecek, T., 2018. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360, 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>.

78. Psomiadis, E., Kavvadias, A., & Charalampopoulos, I. (2025). *High-accuracy UAS imagery for the estimation of olive tree canopy volume*.

79. Schneider et al. (2019). Environmental integrity of international carbon market mechanisms. *Climate Policy*.

80. Smith et al. (2020). Which practices co-deliver climate mitigation and adaptation in agriculture? *Global Change Biology*.

81. United Nations. (2025a). Hunger. United Nations Sustainable Development. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/hunger/>

82. United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2015). The “4 per 1000” initiative and its implementation. <https://sdgs.un.org/partnerships/4-1000-initiative-and-its-implementation>

83. Van der Esch S, ten Brink B, Stehfest E, et al. (2017) Exploring Future Changes in Land use and Land Condition and the Impacts on Food, Water, Climate Change and Biodiversity: Scenarios for the UNCCD Global Land Outlook. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency

84. Vicente-Vicente, J. L., García-Ruiz, R., Francaviglia, R., Aguilera, E., & Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration rates under Mediterranean woody crops using recommended management practices: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235, 204-214.

85. Villat, J., & Nicholas, K. A. (2024). Quantifying soil carbon sequestration from regenerative agricultural practices in crops and vineyards. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1234108.

86. West, T.O. & Post, W.M. (2002) – Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation: A Global Data Analysis

87. White, C. (2020). Why regenerative agriculture? *American Journal of Economics and Sociology*, 79(3), 799-812.

88. Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., et al. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils - a review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* 333, 149–162. doi: 10.1016/j.geoderma.2018. 07.026

89. World Bank (2023). State and Trends of Carbon Pricing.

90. World Bank Group. (2025). State and trends of carbon pricing 2025. World Bank.

91. Wu, H., Cui, H., Fu, C., Li, R., Qi, F., Liu, Z., ... & Qiao, M. (2024). Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review. *Science of the Total Environment*, 909, 168627.
92. Xue, L., Ren, H., Brodribb, T. J., Wang, J., Yao, X., and Li, S. (2020). Long term effects of management practice intensification on soil microbial community structure and co-occurrence network in a non-timber plantation. *For. Ecol. Manag.* 459:117805. doi: 10.1016/j.foreco.2019.117805
93. Yu, W., Sheng, L., Wang, X., Tang, X., Yuan, J., & Luo, W. (2025). Soil microbial carbon use efficiency in natural terrestrial ecosystems. *Biology*, 14(4), 348.
<https://doi.org/10.3390/biology14040348>
94. Zhou M, Zhu B, Wang S, et al. (2017) Stimulation of N₂O emission by manure application to agricultural soils may largely offset carbon benefits: a global meta-analysis. *Global Change Biology* 23: 4068–4083

Ελληνική Βιβλιογραφία

95. Κωσταρά, Ε. Η. (2023). Διαχρονική εξέλιξη του ανθρακικού αποτυπώματος της καλλιέργειας του κελυφωτού φιστικιού (*Pistacia Vera*) (Master's thesis).

96. Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). (2025). Στόχος 2: Δίνουμε τέλος στην πείνα, πετυχαίνουμε την επισιτιστική ασφάλεια, βελτιώνουμε τη διατροφή και τη βιώσιμη γεωργία.
<https://www.statistics.gr/sdg2>

97. Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ). (2020). *Απογραφή γεωργίας – κτηνοτροφίας 2020*.

<https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SPG31/->

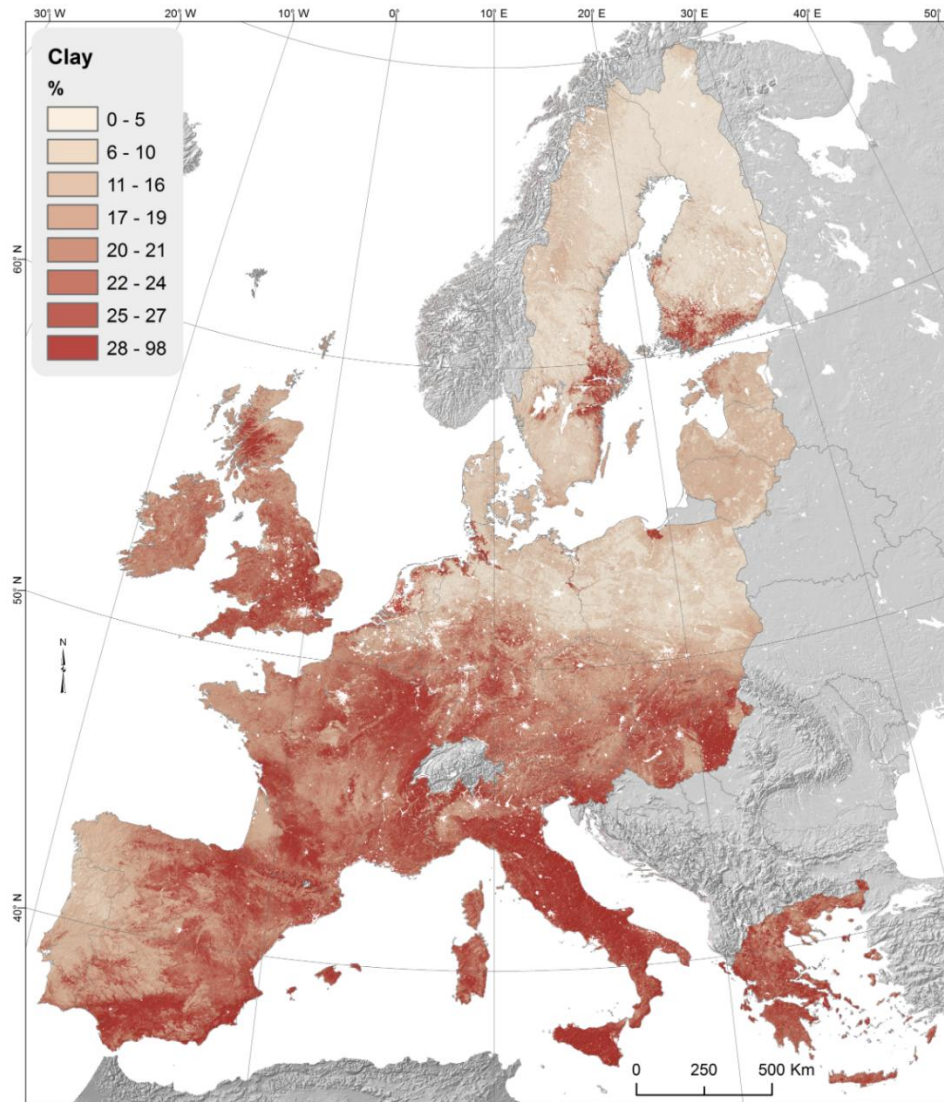
Παράρτημα Α: Περιεκτικότητα στοιχειακού άνθρακα στην ξηρή φυτική βιομάζα των δενδρωδών καλλιεργειών

TABLE 4.3 CARBON FRACTION OF ABOVEGROUND FOREST BIOMASS			
Domain	Part of tree	Carbon fraction, (CF) [tonne C (tonne d.m.) ⁻¹]	References
Default value	All	0.47	McGroddy <i>et al.</i> , 2004

Πηγή: IPCC – Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). Table 4.3

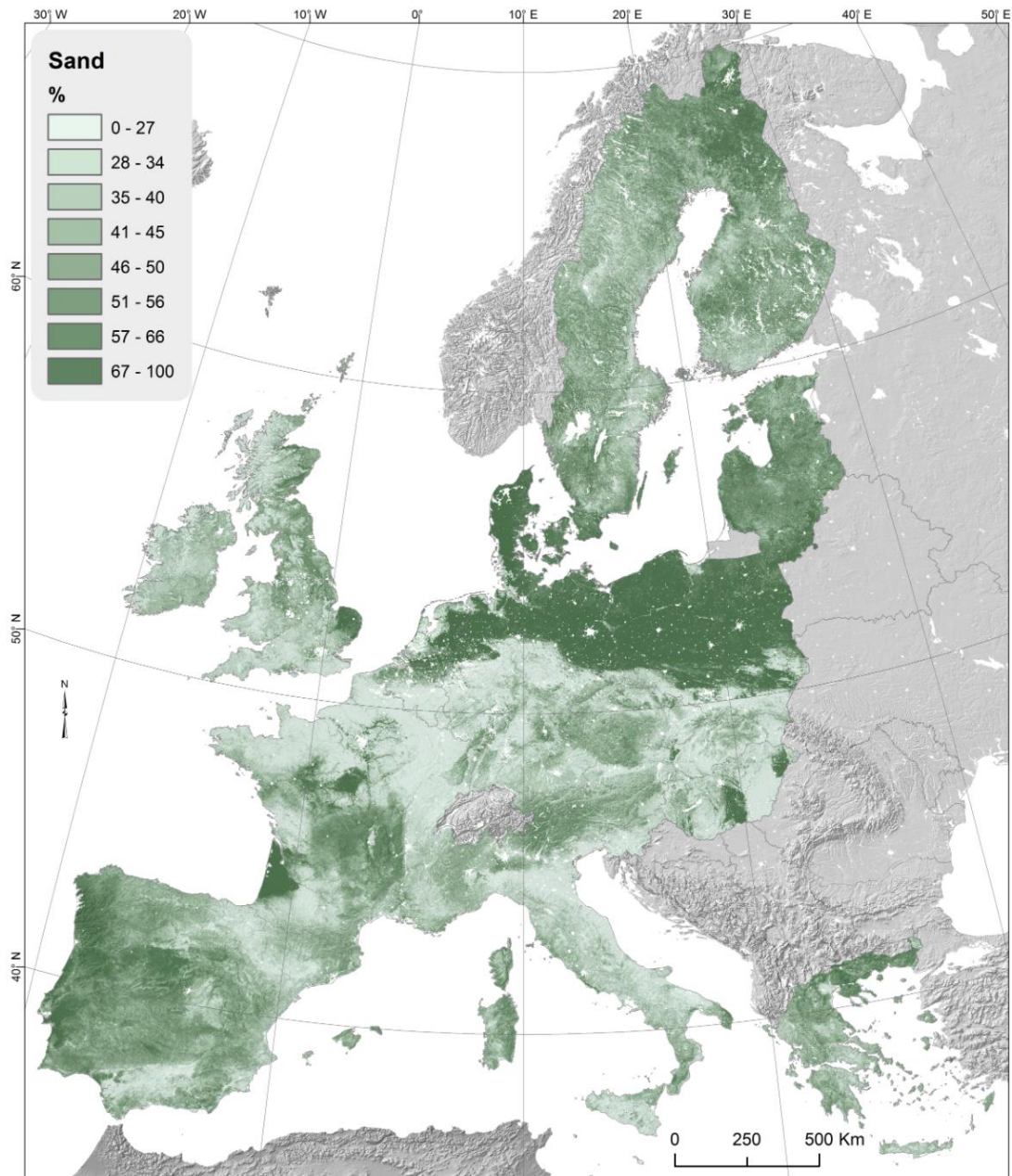
Παράρτημα Β: Χάρτες εδαφικών χαρακτηριστικών Ευρώπης

Παράρτημα Β1: Χάρτης χωρικής κατανομής ποσοστού αργίλου (%) στα εδάφη της Ευρώπης



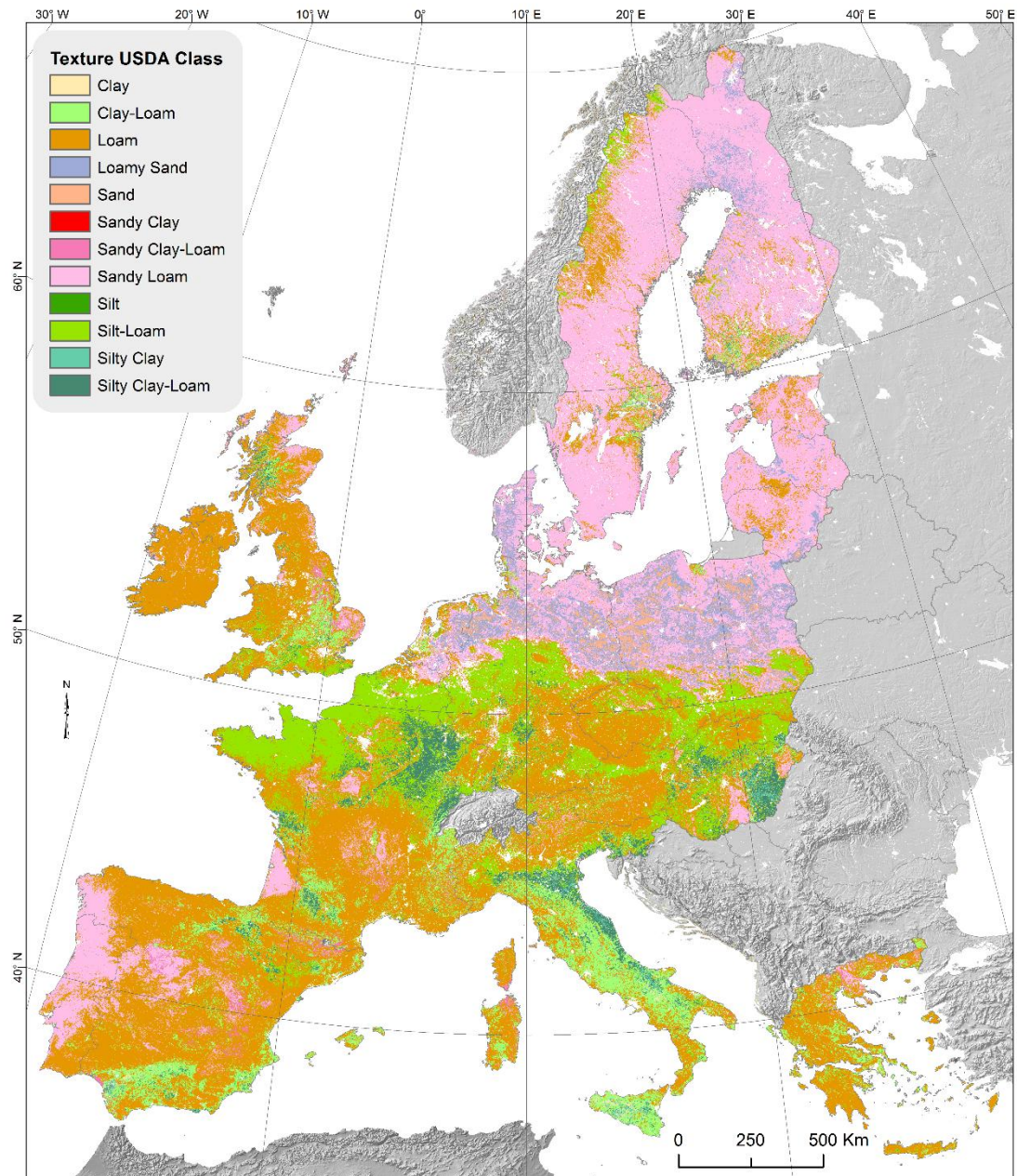
Πηγή: Πηγή: European Soil Data Centre (ESDAC) / USDA soil texture classification.

Παράρτημα Β2: Χάρτης χωρικής κατανομής ποσοστού άμμου (%) στα εδάφη της Ευρώπης



Πηγή: *European Soil Data Centre (ESDAC).*

Παράρτημα Β3: Χάρτης χωρικής κατανομής ποσοστού ιλύος (%) στα εδάφη της Ευρώπης



Πηγή: European Soil Data Centre (ESDAC).

Παράρτημα Γ – Πίνακες παραμέτρων IPCC για τον υπολογισμό SOC

Παράρτημα Γ1: Πίνακας τιμών αναφοράς οργανικού άνθρακα εδάφους (SOC_{ref}) για ορυκτά εδάφη σε βάθος 0–30 cm

TABLE 2.3 DEFAULT REFERENCE (UNDER NATIVE VEGETATION) SOIL ORGANIC C STOCKS (SOC _{REF}) FOR MINERAL SOILS (TONNES C HA ⁻¹ IN 0-30 CM DEPTH)						
Climate region	HAC soils ¹	LAC soils ²	Sandy soils ³	Spodic soils ⁴	Volcanic soils ⁵	Wetland soils ⁶
Boreal	68	NA	10 [#]	117	20 [#]	146
Cold temperate, dry	50	33	34	NA	20 [#]	87
Cold temperate, moist	95	85	71	115	130	
Warm temperate, dry	38	24	19	NA	70 [#]	88
Warm temperate, moist	88	63	34	NA	80	
Tropical, dry	38	35	31	NA	50 [#]	86
Tropical, moist	65	47	39	NA	70 [#]	
Tropical, wet	44	60	66	NA	130 [#]	
Tropical montane	88*	63*	34*	NA	80*	

Πηγή: IPCC (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.*

Σημείωση: Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η τιμή 38 t C ha⁻¹, η οποία αντιστοιχεί σε εδάφη τύπου High Activity Clay (HAC) σε κλιματική ζώνη Warm temperate, dry, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του IPCC.

Παράρτημα Γ2: Συντελεστές μεταβολής αποθέματος οργανικού άνθρακα εδάφους (stock-change factors) για διαφορετικές πρακτικές διαχείρισης καλλιεργούμενων εκτάσεων

TABLE 5.5 RELATIVE STOCK CHANGE FACTORS (F_{LU} , F_{MG} , AND F_I) (OVER 20 YEARS) FOR DIFFERENT MANAGEMENT ACTIVITIES ON CROPLAND						
Factor value type	Level	Temperature regime	Moisture regime ¹	IPCC defaults	Error ^{2,3}	Description
Land use (F_{LU})	Long-term cultivated	Temperate/Boreal	Dry	0.80	± 9%	Represents area that has been continuously managed for >20 yrs, to predominantly annual crops. Input and tillage factors are also applied to estimate carbon stock changes. Land-use factor was estimated relative to use of full tillage and nominal ("medium") carbon input levels.
			Moist	0.69	± 12%	
		Tropical	Dry	0.58	± 61%	
			Moist/Wet	0.48	± 46%	
		Tropical montane ⁴	n/a	0.64	± 50%	
Land use (F_{LU})	Paddy rice	All	Dry and Moist/Wet	1.10	± 50%	Long-term (> 20 year) annual cropping of wetlands (paddy rice). Can include double-cropping with non-flooded crops. For paddy rice, tillage and input factors are not used.
Land use (F_{LU})	Perennial/Tree Crop	All	Dry and Moist/Wet	1.00	± 50%	Long-term perennial tree crops such as fruit and nut trees, coffee and cacao.
Land use (F_{LU})	Set aside (< 20 yrs)	Temperate/Boreal and Tropical	Dry	0.93	± 11%	Represents temporary set aside of annually cropland (e.g., conservation reserves) or other idle cropland that has been revegetated with perennial grasses.
			Moist/Wet	0.82	± 17%	
		Tropical montane ⁴	n/a	0.88	± 50%	
Tillage (F_{MG})	Full	All	Dry and Moist/Wet	1.00	NA	Substantial soil disturbance with full inversion and/or frequent (within year) tillage operations. At planting time, little (e.g., <30%) of the surface is covered by residues.
Tillage (F_{MG})	Reduced	Temperate/Boreal	Dry	1.02	± 6%	Primary and/or secondary tillage but with reduced soil disturbance (usually shallow and without full soil inversion). Normally leaves surface with >30% coverage by residues at planting.
			Moist	1.08	± 5%	
		Tropical	Dry	1.09	± 9%	
			Moist/Wet	1.15	± 8%	
		Tropical montane ⁴	n/a	1.09	± 50%	
Tillage (F_{MG})	No-till	Temperate/Boreal	Dry	1.10	± 5%	Direct seeding without primary tillage, with only minimal soil disturbance in the seeding zone. Herbicides are typically used for weed control.
			Moist	1.15	± 4%	
		Tropical	Dry	1.17	± 8%	
			Moist/Wet	1.22	± 7%	
		Tropical montane ⁴	n/a	1.16	± 50%	

TABLE 5.5 (CONTINUED) RELATIVE STOCK CHANGE FACTORS (F_{LU} , F_{MG} , AND F_I) (OVER 20 YEARS) FOR DIFFERENT MANAGEMENT ACTIVITIES ON CROPLAND						
Factor value type	Level	Temperature regime	Moisture regime ¹	IPCC defaults	Error ^{2,3}	Description
Input (F_I)	Low	Temperate/Boreal	Dry	0.95	$\pm 13\%$	Low residue return occurs when there is due to removal of residues (via collection or burning), frequent bare-fallowing, production of crops yielding low residues (e.g., vegetables, tobacco, cotton), no mineral fertilization or N-fixing crops.
			Moist	0.92	$\pm 14\%$	
		Tropical	Dry	0.95	$\pm 13\%$	
			Moist/Wet	0.92	$\pm 14\%$	
		Tropical montane ⁴	n/a	0.94	$\pm 50\%$	
Input (F_I)	Medium	All	Dry and Moist/Wet	1.00	NA	Representative for annual cropping with cereals where all crop residues are returned to the field. If residues are removed then supplemental organic matter (e.g., manure) is added. Also requires mineral fertilization or N-fixing crop in rotation.
Input (F_I)	High without manure	Temperate/Boreal and Tropical	Dry	1.04	$\pm 13\%$	Represents significantly greater crop residue inputs over medium C input cropping systems due to additional practices, such as production of high residue yielding crops, use of green manures, cover crops, improved vegetated fallows, irrigation, frequent use of perennial grasses in annual crop rotations, but without manure applied (see row below).
			Moist/Wet	1.11	$\pm 10\%$	
		Tropical montane ⁴	n/a	1.08	$\pm 50\%$	
Input (F_I)	High with manure	Temperate/Boreal and Tropical	Dry	1.37	$\pm 12\%$	Represents significantly higher C input over medium C input cropping systems due to an additional practice of regular addition of animal manure.
			Moist/Wet	1.44	$\pm 13\%$	
		Tropical montane ⁴	n/a	1.41	$\pm 50\%$	

Πηγή: IPCC (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.*

Σημείωση: Για τον υπολογισμό της μεταβολής του SOC στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συντελεστές:

- $FLU = 1.00$ για μόνιμες δενδρώδεις καλλιέργειες (perennial tree crops)
- $FMG = 1.00$ για πλήρη κατεργασία εδάφους (full tillage) στο συμβατικό σύστημα
- $FMG = 1.10$ για μειωμένη κατεργασία (reduced tillage)
- $FI = 0.95$ για χαμηλές οργανικές εισροές (low input)

Οι συντελεστές αυτοί εφαρμόζονται σύμφωνα με τη μεθοδολογία Tier 1 του IPCC για την εκτίμηση της μεταβολής του οργανικού άνθρακα του εδάφους.

Παράρτημα Δ – Συνολική έκταση ελαιώνων

Εκτάσεις σε στρέμματα							
ΚΩΔΙΚΟΙ ΚΑΛΛΙΚΡΑΤΗ ΚΑΛΙΚΡΑΤΙΣ CODES	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΕΣ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ ΔΗΜΟΙ ΚΑΙ ΔΗΜΟΤΙΚΕΣ ΕΝΟΤΗΤΕΣ	ΕΛΑΙΩΝΕΣ OLIVE PLANTATIONS					
		ΣΥΝΟΛΟ TOTAL		ΕΛΑΙΟΠΟΙΗΣΗΣ FOR OIL PRODUCTION		ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ FOR TABLE OLIVES	
		ΕΚΜΕΤΑΛ- ΛΕΥΣΕΙΣ HOLDINGS	ΕΚΤΑΣΗ AREA	ΕΚΜΕΤΑΛ- ΛΕΥΣΕΙΣ HOLDINGS	ΕΚΤΑΣΗ AREA	ΕΚΜΕΤΑΛ- ΛΕΥΣΕΙΣ HOLDINGS	ΕΚΤΑΣΗ AREA
00	ΣΥΝΟΛΟ ΧΩΡΑΣ	313.264	5.842.422,6	296.238	5.220.692,4	32.914	621.730,2

Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, 2020

<https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SPG31/->