



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ  
& ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ, ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ  
ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

**Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**

Εκτίμηση του οργανικού άνθρακα του εδάφους  
με νευρωνικό δίκτυο MLP

**Ζωή Γ. Παπαδοπούλου**

Επιβλέπων καθηγητής:  
Διονύσης Καλύβας, Καθηγητής ΓΠΑ

**Αθήνα,  
2021**

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ  
& ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία**

Εκτίμηση του οργανικού άνθρακα του εδάφους  
με νευρωνικό δίκτυο MLP

Estimation of soil organic carbon using MLP neural network

**Ζωή Γ. Παπαδοπούλου**

Εξεταστική Επιτροπή:

Διονύσης Καλύβας, Καθηγητής ΓΠΑ (Επιβλέπων)

Δημήτρης Τριαντακωνσταντής, Ερευνητής ΕΛΓΟ Δήμητρα

Κωνσταντίνος Σούλης, ΕΔΙΠ ΓΠΑ

## **Εκτίμηση του οργανικού άνθρακα του εδάφους με νευρωνικό δίκτυο MLP**

ΠΜΣ Φυσικοί Πόροι, Γεωπεριβάλλον, Γεωπληροφορική & Γεωργική Μηχανική  
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής

### **Περίληψη**

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να κατανοηθεί ο ρόλος των καλλιεργήσιμων εδαφών στη δέσμευση του CO<sub>2</sub> και στις επιπτώσεις που έχει στην κλιματική αλλαγή. Σημαντικό ρόλο στη δέσμευση του άνθρακα διαδραματίζουν οι εδαφοκλιματικές συνθήκες μιας περιοχής. Γι' αυτό, στην προκειμένη περίπτωση αξιολογήθηκαν γεωργικά εδάφη με εδαφοκλιματικά δεδομένα και υπολογίστηκε ο οργανικός άνθρακας που υπάρχει διαθέσιμος στα εδάφη αυτά. Ως πιλοτική περιοχή χρησιμοποιήθηκε το Μαλανδρίνο Φωκίδας για την ανάπτυξη κατάλληλου μοντέλου, που υπολογίζει την ποσότητα οργανικού άνθρακα. Ο οργανικός άνθρακας εκτιμήθηκε από υπάρχοντα εδαφολογικά δεδομένα (αρχείο ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ), καθώς και δορυφορικές εικόνες, που βρίσκονται ελευθέρως διαθέσιμες στο διαδίκτυο, όπως είναι αυτές του δορυφόρου Sentinel. Προτιμήθηκε η μέθοδος του πολυεπίπεδου νευρωνικού δικτύου (MLP) που εκτιμά, στη συγκεκριμένη περίπτωση, την ποσότητα του εδαφικού άνθρακα. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν η άργιλος, το pH, τα άλατα, το NDVI, καθώς και οι δείκτες γυμνού εδάφους (Bare Soil Index) και χρωματισμού του εδάφους (Soil Color Index). Από το σύνολο των δεδομένων της περιοχής χρησιμοποιήθηκε το 70% αυτών (για εκπαίδευση του μοντέλου), ώστε με το υπόλοιπο 30% να γίνει μία επαλήθευση της προσαρμοστικότητάς του. Πριν τη δημιουργία του μοντέλου νευρωνικού δικτύου έγινε ανάλυση των κύριων συνιστωσών, ώστε να μετατραπούν οι τιμές της ομάδας των παραπάνω (ανεξάρτητων) μεταβλητών, που είναι δυνητικά συσχετιζόμενες, σε μία ομάδα νέων τιμών μη γραμμικά συσχετιζόμενων μεταβλητών, οι οποίες ονομάζονται κύριες συνιστώσες. Τα επιτυχή αποτελέσματα, που προέκυψαν από το νευρωνικό δίκτυο MLP, έδειξαν πως το μοντέλο αυτό παρουσιάζει καλή προσαρμοστικότητα στην περιοχή, με R<sup>2</sup> 0,69. Συνεπώς, μέσα από τη μελέτη αναδεικνύεται η δυνατότητα ευρείας εφαρμογής του μοντέλου, η καλύτερη κατανόηση της γονιμότητας των εδαφών, καθώς και η συμβολή του στο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

**Επιστημονική περιοχή:** Εκτίμηση εδαφικού άνθρακα

**Λέξεις κλειδιά:** Οργανική ουσία, Κλιματική αλλαγή, Νευρωνικό Δίκτυο, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Τηλεπισκόπηση

## **Estimation of soil organic carbon using MLP neural network**

MSc Natural resources, Geoenvironment, Geoinformatics & Agricultural Engineering  
Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering

### **Abstract**

This paper aims to understand the role of arable land in CO<sub>2</sub> capture and its impact on climate change. Soil and climate conditions of an area play an important role in the capture of coal. For the purpose of this assignment, soil and climate conditions of agricultural land were evaluated and the available organic carbon was calculated. The pilot area that was selected to develop a suitable model for the calculation of the amount of organic carbon, was Malandrino in Fokida. The organic carbon has been estimated based on existing soil data (ELGO-DIMITRA file) and satellite images freely available on the Internet, such as the Sentinel satellite's images. The method of multilayer perceptron (MLP) was chosen to predict the amount of soil carbon. The independent variables were clay, pH, salts, NDVI, as well as bare soil index and soil color index. 70% of region's aggregate data was used (model training), while the remaining 30% was employed to verify network's adaptability. Before generating the neural network model, principal component analysis was used to convert the values of the group of the aforementioned (independent) variables that are potentially correlated, into a set of new values of non-linearly related variables, called principal components. The successful results from the MLP network, indicate that the model has good adaptability in the region with R<sup>2</sup> 0.69. Consequently, the study contributes to the possibility of the model's broad implementation, to the enhanced understanding of soil fertility and lastly, to the mitigation of climate change.

**Scientific area:** Estimation of soil organic carbon

**Keywords:** Organic carbon, Climate change, Neural Network, Geographic Information Systems, Remote Sensing

## Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Παπαδοπούλου Ζωή, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Υπεύθυνη Δήλωση: Βεβαιώνω ότι είμαι η κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και απ' όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων. Επίσης, αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από την ψηφιακή βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο, καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω το Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων του ΕΛΓΟ Δήμητρα για την παροχή των εδαφολογικών δεδομένων της περιοχής μελέτης, καθώς και του κατάλληλου εξοπλισμού για την επεξεργασία των στοιχείων αυτών. Ιδιαίτερως, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω θερμά τον κο. Δημήτρη Τριαντακωνσταντή για την πολύτιμη βοήθεια, τη συνεχή καθοδήγηση και την αμέριστη υποστήριξή του, που βρισκόταν καθ' όλη τη διάρκεια στο πλευρό μου για την υλοποίηση αυτής της εργασίας και που θέλησε να μου εμπιστευτεί την παρούσα μελέτη. Επίσης, δε θα ήθελα να παραλείψω τον επιβλέπων καθηγητή μου, τον κο. Διονύση Καλύβα που χάρη στη βοήθεια και τις ουσιώδεις συμβουλές του, κατάφερα να βγάλω εις πέρας την μεταπτυχιακή μου διατριβή. Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να το εκφράσω στην οικογένειά μου, καθώς και στα αγαπημένα μου πρόσωπα που με στήριξαν καθ' όλο αυτό το χρονικό διάστημα στις επιλογές μου, μου έδωσαν κουράγιο να προχωράω μπροστά στη ζωή μου και μου έμαθαν να μην τα παρατάω ποτέ σε ό,τι κι αν κάνω.

«Με την άδειά μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της».

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κατάλογος Εικόνων.....	8
Κατάλογος Πινάκων.....	9
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	10
Κατάλογος Χαρτών.....	11
Συνομογραφίες.....	12
Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 1: Η σημασία της οργανικής ουσίας στο έδαφος.....	15
1.1. Ποιότητα του εδάφους.....	16
1.2. Κρίσιμη ζώνη της γης.....	16
1.3. Η δομή του εδάφους.....	17
1.4. Η οργανική ουσία στο έδαφος.....	18
Κεφάλαιο 2: Κλιματική αλλαγή και γεωργία.....	21
2.1. Η περίπτωση της Ελλάδας.....	22
2.2. Επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών & χρήσεων γης στην οργανική ύλη – Υποβάθμιση του εδάφους.....	26
2.3. Συμβολή της έρευνας στη γεωργία & πρακτικές μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου.....	28
Κεφάλαιο 3: Σύγχρονες τεχνολογίες αποτίμησης στην κλιματική αλλαγή.....	31
3.1. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.....	31
3.2. Τηλεπισκόπηση.....	39
3.3. Άλλες τεχνολογίες.....	46
4. Εμπειρική ανάλυση.....	48
4.1. Δεδομένα – Περιοχή μελέτης.....	48
4.2. Μεθοδολογία.....	59
4.2.1. Επανασύσταση δορυφορικής εικόνας (resampling).....	59
4.2.2. Στατιστική ανάλυση δεδομένων.....	60
4.2.2. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN).....	71
4.3. Αποτελέσματα τεχνητών νευρικών δικτύων με SPSS.....	77
5. Συμπεράσματα.....	85
Βιβλιογραφία.....	86

## Κατάλογος Εικόνων

Εικ.1. Η κρίσιμη ζώνη της γης .....	σελ. 17
Εικ.2. Ροές υλικών, ενέργειας και γενετικού υλικού της Κρίσιμης Ζώνης της Γης .....	σελ. 17
Εικ.3. Πυραμίδα των κλάσεων εδάφους .....	σελ. 18
Εικ.4. Ροές άνθρακα σε χερσαίο οικοσύστημα .....	σελ. 19
Εικ.5. Πολυετείς καλλιέργειες (μίσχανθος, σύλφιο και μολόχα) που δεσμεύουν οργανική ύλη .....	σελ. 27
Εικ.6. Το λογότυπο του προγράμματος ClimaTree .....	σελ. 37
Εικ.7. Πύραυλος V-2 .....	σελ. 40
Εικ.8. Οι Landsat 1-3 .....	σελ. 42
Εικ.9. Οι Landsat 4-5 .....	σελ. 42
Εικ.10. Ο Landsat 7 .....	σελ. 43
Εικ.11. Ο Landsat 8 .....	σελ. 43
Εικ.12. Οι Landsat δορυφόροι με την πάροδο του χρόνου .....	σελ. 43
Εικ.13. Ο Sentinel 1 .....	σελ. 44
Εικ.14. Ο Sentinel 2 δορυφόρος .....	σελ. 46
Εικ.15. Απεικόνιση βιολογικού νευρώνα .....	σελ. 71



## Κατάλογος Πινάκων

Πίν.1: Εκπομπές CO <sub>2</sub> (χιλιάδες τόνοι) στο γεωργικό τομέα σε χώρες της ΕΕ (ενδεικτικά μερικές) .....	σελ. 23
Πίν.2: Σύγκριση κλασμάτων γεωργικών εκμεταλλεύσεων σε Ελλάδα και ΕΕ (2017) .....	σελ. 25
Πίν.3: Ποσοστά κατανομής γεωργίας σε Ελλάδα και ΕΕ (2019) .....	σελ. 26
Πίν.4: Τα 13 φασματικά κανάλια των Sentinel-2 δορυφόρων .....	σελ. 45
Πίν.5: Ταξινόμηση με βάση το μέγεθος των κόκκων σε χιλιοστά .....	σελ. 50
Πίν.6: Παραδείγματα ανθεκτικότητας φυτών στην αλατότητα .....	σελ. 56
Πίν.7: Αριθμητικός μέσος, τυπικό σφάλμα αριθμητικού μέσου & επικρατούσα τιμή όλων των μεταβλητών .....	σελ. 60-61
Πίν.8: Διάμεσος όλων των μεταβλητών .....	σελ. 61
Πίν.9: Εύρος όλων των μεταβλητών .....	σελ. 61
Πίν.10: Ενδοτεταρτημοριακό εύρος όλων των μεταβλητών .....	σελ. 61
Πίν.11: Διακύμανση & τυπική απόκλιση όλων των μεταβλητών .....	σελ. 62
Πίν.12: Στατιστικός έλεγχος Kolmogorov-Smirnov .....	σελ. 62
Πίν.13: Ασυμμετρία όλων των μεταβλητών .....	σελ. 63
Πίν.14: Κύρτωση όλων των μεταβλητών .....	σελ. 64
Πίν.15: Ανάλυση συσχέτισης Pearson .....	σελ. 68
Πίν.16: Ανάλυση συσχέτισης Spearman .....	σελ. 68-69
Πίν.17: Συντελεστής προσαρμογής κάθε μεταβλητής .....	σελ. 77-78
Πίν.18: Ποσοστό ερμηνείας κάθε παράγοντα .....	σελ. 78
Πίν.19: Τιμές των συνιστωσών που αντιστοιχούν σε κάθε μεταβλητή .....	σελ. 78-79
Πίν.20: Το σύνολο των παρατηρήσεων που συμμετέχει στο MLP .....	σελ. 79
Πίν.21: Πληροφορίες νευρωνικού δικτύου .....	σελ. 80
Πίν.22: Σύνοψη του μοντέλου .....	σελ. 81
Πίν.23: Δείκτες προσαρμογής του μοντέλου .....	σελ. 82
Πίν.24: Βάρη .....	σελ. 82-83
Πίν.25: Επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών ως προς τη σημαντικότητα ...	σελ. 84

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγρ.1: Κατανομή των γεωργικών περιοχών που είναι υπό χρήση ανά κατηγορία (μόνιμες καλλιέργειες, μόνιμοι βοσκότοποι, καλλιεργήσιμη γη, άλλο) .....	σελ. 22
Διάγρ.2: Γεωργία, αγροδιατροφή και ΑΕΠ σε Ελλάδα και ΕΕ (1995-2019) .....	σελ. 24
Διάγρ.3: Κατανομή αξίας της αγροδιατροφής στην Ελλάδα (2008-2017) .....	σελ. 25
Διάγρ.4: Η κατανομή των τιμών που μπορεί να λάβει το pH .....	σελ. 53
Διάγρ.5: Q-Q plot .....	σελ. 64
Διάγρ.6: Διασπορά των μεταβλητών ανά ζεύγη .....	σελ. 65
Διάγρ.7: Διασπορά των μεταβλητών ανά ζεύγη (συνέχεια) .....	σελ. 66
Διάγρ.8: Απλοποιημένο μοντέλο τεχνητού νευρώνα .....	σελ. 72
Διάγρ.9: Βηματική συνάρτηση .....	σελ. 73
Διάγρ.10: Λογιστική συνάρτηση .....	σελ. 73
Διάγρ.11: Δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης .....	σελ. 74
Διάγρ.12: Πολυεπίπεδο πρόσθιας τροφοδότησης .....	σελ. 75
Διάγρ.13: Ελεγχόμενη εκμάθηση .....	σελ. 76
Διάγρ.14: Η κατεύθυνση ροής των δύο σημάτων κατά την εκπαίδευση του MLP .....	σελ. 76
Διάγρ.15: Πολυεπίπεδο νευρωνικό δίκτυο .....	σελ. 80
Διάγρ.16: Πρόβλεψη οργανικής ουσίας του εδάφους .....	σελ. 83
Διάγρ.17: Σφάλμα και προβλεπόμενη τιμή .....	σελ. 84
Διάγρ.18: Σημασία των μεταβλητών .....	σελ. 84

## Κατάλογος Χαρτών

Χάρ.1: Παγκόσμια κατανομή οργανικού άνθρακα .....	σελ. 20
Χάρ.2: Το Εθνικό Πάρκο Westland Tai Routini στις δυτικές ακτές της Νέας Ζηλανδίας .....	σελ. 37
Χάρ.3: Η κλιματική αλλαγή με την επίδραση του μονοξειδίου του άνθρακα .....	σελ. 38
Χάρ.4: Οι περιοχές γύρω από το Τόκιο της Ιαπωνίας με βάση το πρώτο σενάριο .....	σελ. 38
Χάρ.5: Η περιοχή μελέτης .....	σελ. 48
Χάρ.6: Σημεία απ' όπου λήφθηκαν δείγματα του εδάφους .....	σελ. 49
Χάρ.7: Χωρική κατανομή της αργίλου στην περιοχή .....	σελ. 51
Χάρ.8: Χωρική παρεμβολή αργίλου .....	σελ. 52
Χάρ.9: Χωρική παρεμβολή pH .....	σελ. 54
Χάρ.10: Χωρική κατανομή των αλάτων στην περιοχή .....	σελ. 55
Χάρ.11: Χωρική παρεμβολή αλάτων .....	σελ. 55
Χάρ.12: Δείκτης NDVI της περιοχής του Μαλανδρίνο .....	σελ. 57
Χάρ.13: Δείκτης BSI της περιοχής του Μαλανδρίνο .....	σελ. 58
Χάρ.14: Δείκτης SCI της περιοχής του Μαλανδρίνο .....	σελ. 59
Χάρ.15: Προβλεπόμενος οργανικός άνθρακας στην περιοχή του Μαλανδρίνο .	σελ. 81

## Συντομογραφίες

ΑΕΠ	Ακαθάριστο Εθνικό Προϊόν
BA	Βορειοανατολικά
ΕΓΣΑ '87	Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
εκ.	εκατοστά
ΕΟΚ	Ευρωπαϊκή Οικονομική Κοινότητα
ΕΟΠ	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος
κ.ά.	και άλλα
κτλ.	και τα λοιπά
ΤΝΔ	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα
ΧΥΤΑ	Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων
BSI	Bare Soil Index
CaCO <sub>3</sub>	Ανθρακικό ασβέστιο
CH <sub>4</sub>	Μεθάνιο
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Γλυκόζη
CO <sub>2</sub>	Διοξείδιο του άνθρακα
CO <sub>2</sub> e	Ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα
Eurostat	Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία
FA	Factor Analysis
FAO	Food and Agriculture Organization (Διεθνής Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας)
GPP	Gross Primary Production
H	Υδρογόνο
MLP	Multilayer Perceptron
mm	Χιλιοστά
Mt	Megatones
N	Άζωτο
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Νιτρικό αμμώνιο
N <sub>2</sub> O	Υποξείδιο του αζώτου
O	Οξυγόνο
P	Φώσφορος
PCA	Principal Component Analysis
S	Θείο
SCI	Soil Color Index
SNAP	Sentinel Application Platform
SNN	Supervised Neural Network
SOM	Soil Organic Matter
SPSS	Superior Performance Software System

## Εισαγωγή

Λόγω της συνεχούς αύξησης του πληθυσμού κι επομένως και των καταναλωτικών προτύπων διαβίωσής του, γίνεται επιτακτική η ανάγκη αντίστοιχης αύξησης της παραγωγής τροφίμων. Η βιώσιμη γεωργία έρχεται αντιμέτωπη με προκλήσεις που αφορούν την παγκόσμια ζήτηση τροφίμων, τη χρήση των πρώτων υλών, την κατανάλωση ενέργειας και ποιότητας νερού κ.ά.

Σημαντική πίεση στο γεωργικό τομέα θα ασκήσουν οι σοβαρές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, τις οποίες καλείται σήμερα ο άνθρωπος να αντιμετωπίσει. Οι μεταβολές στη θερμοκρασία και τις βροχοπτώσεις, καθώς και τα ακραία καιρικά και κλιματικά φαινόμενα επηρεάζουν την απόδοση των καλλιεργειών και την παραγωγικότητα της κτηνοτροφίας, όπως επίσης την άρδευση, τις πρακτικές ποτίσματος των ζώων, τη μεταποίηση των γεωργικών προϊόντων και τις συνθήκες μεταφοράς και αποθήκευσης (ΕΟΠ, 2019α). Αυτό μπορεί να οδηγήσει είτε στην απώλεια της βιοποικιλότητας και την υποβάθμιση των εδαφών (Foley κ.ά., 2011), είτε στην εγκατάλειψη των γεωργικών εκτάσεων που έχουν πληγεί από την κλιματική αλλαγή σε ορισμένα τμήματα της υδρογείου.

Η υποβάθμιση των εδαφών οφείλεται στην απώλεια της οργανικής ύλης. Πρακτικές, όπως το βαθύ όργωμα, οδηγούν στην καταστροφή της δομής τους, αφού το οργανικό υλικό είναι πλέον διαθέσιμο στους αποικοδομητές. Παράλληλα, η κυκλοφορία του οξυγόνου και του νερού εμποδίζεται με αποτέλεσμα τη μείωση της λειτουργικότητας και αποδοτικότητάς του.

Με βάση τα παραπάνω, η διατήρηση ενός υγιούς εδάφους είναι καίριας σημασίας. Ως υγιές – γόνιμο έδαφος μπορεί να οριστεί το έδαφος που επιτρέπει στα φυτά να αναπτυχθούν και να φτάσουν στη μέγιστη παραγωγή τους, χωρίς να προσβάλλονται από φυτοπαθογόνους οργανισμούς και να απαιτείται η εφαρμογή χημικών λιπασμάτων (Κοτρωνάκης, 2018). Βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση ενός τέτοιου εδάφους που επηρεάζει σημαντικά τις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες, καθώς και τις λειτουργίες των εδαφών είναι η οργανική ουσία (Allison, 1973). Η προσθήκη της στα καλλιεργήσιμα εδάφη παρέχει μία πηγή θρεπτικών συστατικών για την ανάπτυξη των φυτών και κατά συνέπεια και των αποδόσεων των καλλιεργειών (Fagnano κ.ά., 2011), θέτει σε ενεργητικότητα μικροοργανισμούς παράγοντας ένζυμα και ενισχύει την σταθερότητα του εδάφους στις επιδράσεις του νερού (Franco-Otero κ.ά., 2012).

Το πρόβλημα της υποβάθμισης εμφανίζεται σε κάθε έδαφος στο οποίο χρησιμοποιούνται μη αειφόρες αγροτικές πρακτικές. Είναι πολύ σημαντικό, λοιπόν, να δοθούν οι κατάλληλες οδηγίες για την αντιμετώπιση του φαινομένου, όσον αφορά την απώλεια του οργανικού άνθρακα, ώστε στη συνέχεια να μπορούν να εξεταστούν

τρόποι - οδηγίες με τους οποίους μπορεί να γίνει αειφόρος η εκμετάλλευση του εδάφους και η αγροτική ανάπτυξη. Με τις οδηγίες αυτές είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι απειλές ανάλογα με το βαθμό επικινδυνότητάς τους για τη σωστή λήψη αποφάσεων από αρμόδιους φορείς.

Τα οργανικά λιπάσματα (ή αλλιώς εδαφοβελτιωτικά) χρησιμοποιούνται προκειμένου να εμπλουτιστεί το έδαφος με οργανική ουσία και να βελτιωθεί η γονιμότητά του. Το πιο γνωστό της κατηγορίας αυτής λιπασμάτων είναι η ζωική κοπριά. Το δυναμικό των εδαφοβελτιωτικών να αυξάνουν την απόδοση μίας καλλιέργειας και ταυτόχρονα να βελτιώνουν το έδαφος, θα μπορούσε να συμβάλλει στη μείωση της ανησυχίας που υπάρχει σχετικά με την ασφάλεια των τροφίμων.

Ακόμη, στις μέρες μας γίνονται συστηματικές προσπάθειες για την εκτίμηση, καθώς και για την άμβλυση των επιπτώσεων της μεταβολής του κλίματος και επομένως για την αλλαγή της οργανικής ύλης στο έδαφος. Ιδιαίτερη βαρύτητα έχει δοθεί από την επιστημονική κοινότητα στον τρόπο με τον οποίο το φαινόμενο περιλαμβάνεται στις διάφορες πολιτικές – θεσμούς (Plapp, 2001). Η εμπειριστατωμένη γνώση του ζητήματος, αποτελεί προϋπόθεση για τη δημιουργία και ανάπτυξη σωστών και ολοκληρωμένων στρατηγικών δράσεων διευθέτησής του.

Η παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη φιλοδοξεί να ασχοληθεί με την εκτίμηση του εδαφικού άνθρακα με το μοντέλο νευρωνικού δικτύου MLP. Κύρια ερωτήματα που επιχειρεί να ερευνήσει είναι τα εξής: Ποιος είναι ο ρόλος των καλλιεργήσιμων εδαφών στη δέσμευση οργανικού άνθρακα; Πώς μπορούν να περιοριστούν οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής; Πόσο σημαντική είναι η δεντροκάλυψη σε μία περιοχή και ειδικά σε μία αστική; Είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο οργανικός άνθρακας; Αν ναι, ποια μοντέλα θα ήταν κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν και πόσο καλά προσαρμόζονται στα υπάρχοντα δεδομένα; Μπορούν να εφαρμοστούν ευρέως ή περιορίζονται σε μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή;

Έχοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, η εργασία αυτή επιδιώκει να εξετάσει κατά πόσο ο εδαφικός άνθρακας επηρεάζει την κλιματική αλλαγή. Προκειμένου να μην οξυνθεί και να μετριαστεί το φαινόμενο, αυτό που θα ευνοούσε μία περιοχή θα ήταν η δεντροκάλυψη μεγάλης έκτασής της. Τα φυτά μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης απορροφούν διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), δεσμεύοντας τον άνθρακα και παράγοντας οξυγόνο στην ατμόσφαιρα. Χάρη σε αυτά μειώνονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι των μέσων μαζικής μεταφοράς, κυρίως των αυτοκινήτων και των λεωφορείων, καθώς τα φύλλα τους έχουν την ιδιότητα να συγκρατούν τα σωματίδια που περιέχουν τις βλαβερές ουσίες. Τα φυλλώματα των δέντρων μπορούν να λειτουργήσουν και σαν ένα είδος φράγματος για τον ήχο, αλλά και ως φίλτρα για την ηλιακή ακτινοβολία, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση του θορύβου και στη διατήρηση χαμηλότερων θερμοκρασιών στις πόλεις, αντίστοιχα. Επίσης, σε

περιόδους βροχοπτώσεων είναι δυνατόν να συγκρατήσουν σημαντική ποσότητα νερού, αποτρέποντας έτσι την εμφάνιση έντονων πλημμυρικών φαινομένων. Τέλος, η ύπαρξη χώρων πρασίνου, πέρα από τη χαλάρωση, την ηρεμία και την αισθητική βελτίωση ενός αστικού τοπίου, συντελεί στη ρύθμιση του μικροκλίματος. Εύκολα, λοιπόν, μπορεί κανείς να διαπιστώσει πόσο σπουδαία και πολλαπλά είναι τα οφέλη, που απορρέουν από τον εμπλουτισμό μιας μεγαλούπολης με πράσινο.

Ως πιλοτική περιοχή επιλέχθηκε το Μαλανδρίνο Φωκίδας για την ανάπτυξη κατάλληλου μοντέλου (γεωστατιστική ανάλυση), που υπολογίζει την ποσότητα οργανικού άνθρακα. Ο οργανικός άνθρακας εκτιμήθηκε από υπάρχοντα εδαφοκλιματικά δεδομένα, καθώς και δορυφορικές εικόνες του δορυφόρου Sentinel. Προτιμήθηκε η μέθοδος του νευρωνικού δικτύου MLP που προβλέπει την ποσότητά του στο έδαφος. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές ήταν η άργιλος, το pH, τα άλατα, καθώς και οι δείκτες βλάστησης (NDVI), γυμνού εδάφους (BSI) και χρωματισμού εδάφους (SCI). Από το σύνολο των δεδομένων της περιοχής χρησιμοποιήθηκε το 70% αυτών (για εκπαίδευση του μοντέλου), ώστε με το υπόλοιπο 30% να γίνει μία επαλήθευση της προσαρμοστικότητάς του. Πριν τη δημιουργία του μοντέλου νευρωνικού δικτύου, έγινε ανάλυση των κυρίων συνιστωσών (PCA), ώστε να μετατραπούν οι τιμές της ομάδας των παραπάνω (ανεξάρτητων) μεταβλητών, που είναι δυνητικά συσχετιζόμενες, σε μία ομάδα νέων τιμών μη γραμμικά συσχετιζόμενων μεταβλητών, οι οποίες ονομάζονται κύριες συνιστώσες.

Πιο αναλυτικά, η διπλωματική εργασία διαμορφώνεται ως εξής: στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται η σημασία της οργανικής ουσίας στο έδαφος, καθώς και χρήσιμες έννοιες του εδάφους για περαιτέρω κατανόηση, όπως η ποιότητά του, η κρίσιμη ζώνη της γης και η δομή του. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η σχέση της κλιματικής αλλαγής με τη γεωργία και ο τρόπος με τον οποίο αλληλοεπηρεάζονται, ενώ στο τρίτο προβάλλονται οι σύγχρονες τεχνικές χαρτογράφησης της αλλαγής του κλίματος με τη βοήθεια των ΣΓΠ και της Τηλεπισκόπησης. Το επόμενο κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιοχή μελέτης, τα δεδομένα, αλλά και τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν και στο πέμπτο αναλύονται τα αποτελέσματα του μοντέλου που εφαρμόστηκε. Στο τέλος, ακολουθούν κάποια συμπεράσματα της μελέτης, ως απόρροια των δεδομένων που αναλύθηκαν, σχετικά με τη γονιμότητα των εδαφών και τη συμβολή του προαναφερθέντος μοντέλου στο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

## **Κεφάλαιο 1: Η σημασία της οργανικής ουσίας στο έδαφος**

Το έδαφος θεωρείται ένας αξιοσημείωτος φυσικός πόρος, καθώς συμβάλλει σε περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές λειτουργίες (Blum, 2005). Στηρίζει την παραγωγή του 90% του συνόλου των τροφίμων, ζωοτροφών, ινών και καυσίμων

και παρέχει πρώτες ύλες για δραστηριότητες που εκτείνονται από τη φυτοκομία μέχρι τα δομικά έργα. Το έδαφος έχει καθοριστική σημασία στην υγεία των οικοσυστημάτων, καθώς ρυθμίζει τα ύδατα και στηρίζει τη βιοποικιλότητα χάρη στα θρεπτικά συστατικά και τους μικροοργανισμούς που περιέχει. Αποτελεί παγκόσμια δεξαμενή απορρόφησης άνθρακα και κατέχει σημαντικό ρόλο στη δυνητική επιβράδυνση της κλιματικής αλλαγής και ως εκ τούτου και των επιπτώσεών της (ΕΟΠ, 2019β).

Σύμφωνα με τους Wright και Boorse (2012), ως έδαφος ορίζεται «στερεό υλικό γεωλογικής και βιολογικής προέλευσης, που μεταβάλλεται από χημικές, βιολογικές και φυσικές διεργασίες, οι οποίες του προσδίδουν τη δυνατότητα υποστήριξης της ανάπτυξης φυτών».

### **1.1. Ποιότητα του εδάφους**

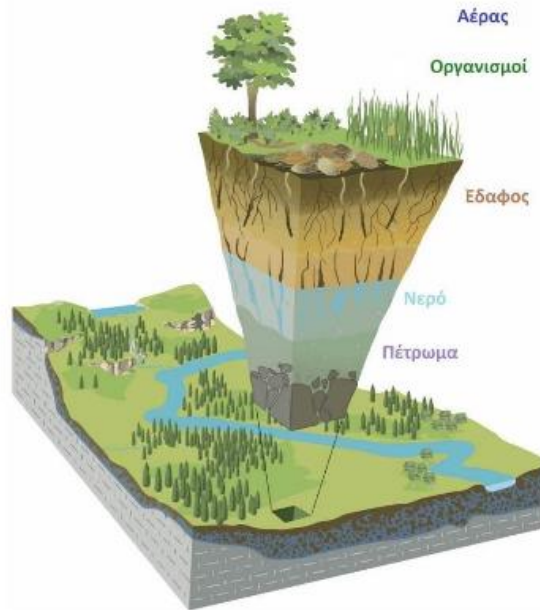
Η Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ στις αρχές τις δεκαετίες του '90 δημοσίευσε ένα βιβλίο με τίτλο "Soil and water quality: an agenda for agriculture". Το γεγονός αυτό ανάγκασε την επιστημονική κοινότητα να στρέψει το ενδιαφέρον της και να επικεντρωθεί στη σπουδαιότητα της *ποιότητας του εδάφους* (National Research Council, 1993).

Η ποιότητα του εδάφους είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τις λειτουργίες που επιτελεί το εδαφικό οικοσύστημα. Οι λειτουργίες αυτές προέρχονται από τις δράσεις φυτών, ζώων και αποικοδομητών, που ζουν και αναπτύσσονται στον ίδιο χώρο και αλληλεξαρτώνται (Alcamo κ.ά., 2005). Τα φυτά προσφέρουν άνθρακα και ενέργεια στο οικοσύστημα, οι αποικοδομητές διασπούν τη νεκρή οργανική ύλη και απελευθερώνουν θρεπτικά συστατικά και CO<sub>2</sub>, ενώ τα ζώα μεταφέρουν ενέργεια και υλικά μέσα, ρυθμίζοντας τη δραστηριότητα φυτών και αποικοδομητών (Charin κ.ά., 2012).

### **1.2. Κρίσιμη ζώνη της γης**

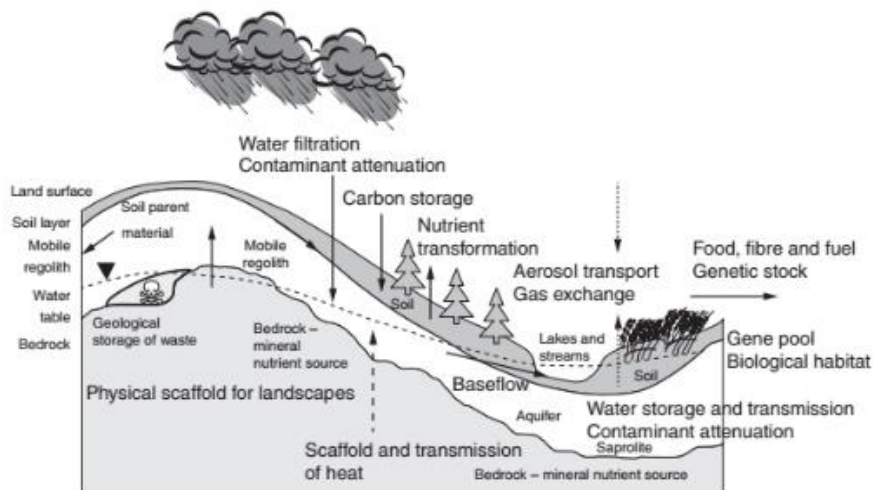
Η κρίσιμη ζώνη (critical zone) της γης περιλαμβάνει όλα τα βιοτικά και αβιοτικά μέρη ενός οικοσυστήματος. Πρόκειται για το περιβάλλον εκείνο που τα πετρώματα, το έδαφος, το νερό, ο αέρας και οι ζωντανοί οργανισμοί αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και διαμορφώνουν την επιφάνεια της γης (Brantley, 2006). Το στρώμα αυτό είναι λεπτό, πορώδες και επιφανειακό και εκτείνεται από τις κορυφές των δέντρων μέχρι τον πυθμένα του υδροφόρου ορίζοντα, παρουσιάζοντας μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα.





Εικόνα 1: Η κρίσιμη ζώνη της γης  
 Πηγή: Critical Zone Observatories, 2012

Το έδαφος βρίσκεται στην καρδιά της κρίσιμης ζώνης ως ενεργό στρώμα που μεταφέρει ροές υλικών, ενέργεια και γενετικό υλικό (βλ. Εικόνα 2) προς την ατμόσφαιρα, τα υπόγεια και επιφανειακά νερά. Οι ροές αυτές προκύπτουν από τις περιβαλλοντικές διεργασίες της κρίσιμης ζώνης παρέχοντας αγαθά και υπηρεσίες στο ανθρώπινο είδος (Banwart κ.ά., 2012).

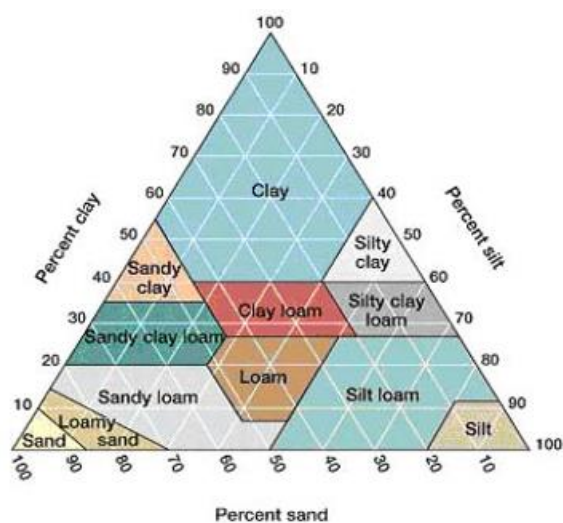


Εικόνα 2: Ροές υλικών, ενέργειας και γενετικού υλικού της κρίσιμης ζώνης της γης  
 Πηγή: Banwart κ.ά., 2012

### 1.3. Η δομή του εδάφους

Η δομή έχει καθοριστικό ρόλο στην επιτέλεση των λειτουργιών. Σύμφωνα με την Mills (2018), ως δομή θεωρείται η διάταξη των σωματιδίων του εδάφους

(άργιλος, ιλύς, άμμος) σε συσσωματώματα<sup>1</sup> υπό την επίδραση διαφόρων παραγόντων, όπως η μηχανική σύσταση του εδάφους, η οργανική ουσία, το νερό, οι μικροοργανισμοί κ.ά.



Εικόνα 3: Πυραμίδα των κλάσεων εδάφους

Πηγή: Google

Η δομή είναι αυτή που καθορίζει το επίπεδο γονιμότητας και παραγωγικότητας του εδάφους. Έτσι, για παράδειγμα, μία χαλαρή δομή που επιτρέπει τη διήθηση και διέλευση αέρα και νερού, είναι ζωτικής σημασίας για την υγιή ανάπτυξη των φυτών και επομένως είναι η ιδανική περίπτωση δομής του εδάφους. Σε αντίθετη περίπτωση, τα φυτά δεν είναι σε θέση να απορροφήσουν τα θρεπτικά συστατικά από το έδαφος, καθώς θα παρουσιάζουν έλλειψη νερού και οξυγόνου και τελικά θα καταστρέφονται. Ακόμη, περιοχές που η βασική εδαφική τους σύσταση - υφή είναι η άργιλος, αποθηκεύουν περισσότερο άνθρακα έναντι αυτών που αποτελούνται από άμμο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος των κόκκων της αργίλου θεωρείται πως έχει τη μικρότερη διάμετρο (<0,002mm) και ακολουθούν οι κόκκοι ιλύς και άμμου.

#### 1.4. Η οργανική ουσία στο έδαφος

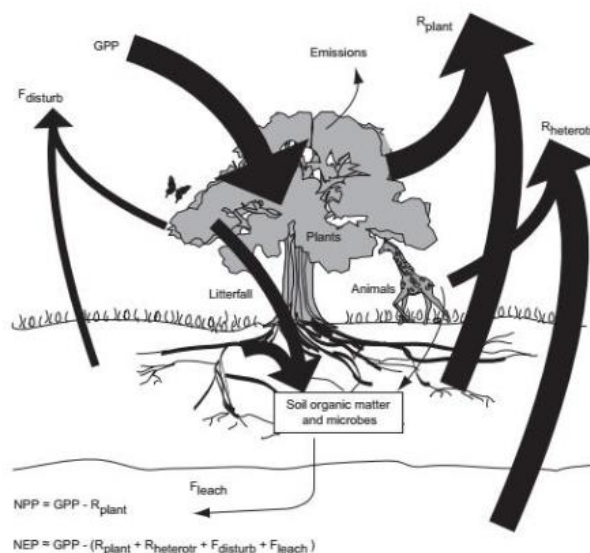
Η οργανική ουσία (ή ύλη) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη συσσωμάτωση του εδάφους (Elliott, 1986). Αποτελείται από υπολείμματα φυτών και ζώων στα διάφορα στάδια της αποσύνθεσής τους, μικροοργανισμών (Arias κ.ά., 2005), ουσιών που συντίθενται μέσω μικροβιακών - χημικών αντιδράσεων και χούμους<sup>2</sup> (Lal κ.ά., 2007). Η δομή του εδάφους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα της οργανικής ουσίας στο έδαφος, καθώς όσο υψηλότερη είναι, τόσο καλύτερη είναι και η δομή του.

<sup>1</sup> Ομάδες σωματιδίων που συνδέονται πιο ισχυρά μεταξύ τους απ' ότι με τα γειτονικά σωματίδια.

<sup>2</sup> Πρόκειται για αποσυντιθέμενο φυτικό υλικό.

Η οργανική ύλη είναι δυνατόν να επιδρά με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους στο έδαφος, όπως στη δημιουργία και ρύθμιση της θερμοκρασίας του, την αποσάθρωση ορυκτών, την ενίσχυση της μικροβιακής δραστηριότητας, την απορρόφηση βαρέων μετάλλων και τη συγκράτηση νερού. Επίσης, εφοδιάζει το έδαφος με θρεπτικά στοιχεία προσφέροντας ταχεία ανάπτυξη στα φυτά.

Τα φυτά μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης διαχωρίζουν το νερό και το CO<sub>2</sub>, δεσμεύουν τον άνθρακα στις οργανικές ύλες του εδάφους και στη συνέχεια απελευθερώνουν οξυγόνο και παράγεται γλυκόζη (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>). Η φωτοσύνθεση πραγματοποιείται μέσα από μία σειρά πολύπλοκων αντιδράσεων: 6CO<sub>2</sub> + 6H<sub>2</sub> → C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> + 6O<sub>2</sub> + Ενέργεια. Στην κλίμακα των οικοσυστημάτων, η φωτοσύνθεση ονομάζεται ακαθάριστη πρωτογενής παραγωγή (GPP). Περίπου το μισό της παραγωγής αυτής επιστρέφεται στην ατμόσφαιρα μέσω της αναπνοής των φυτών, προκειμένου να προσφέρεται σε αυτά η απαραίτητη ενέργεια για την ανάπτυξη και συντήρησή τους (Waring κ.ά., 1998).



**Εικόνα 4: Ροές άνθρακα σε χερσαίο οικοσύστημα**

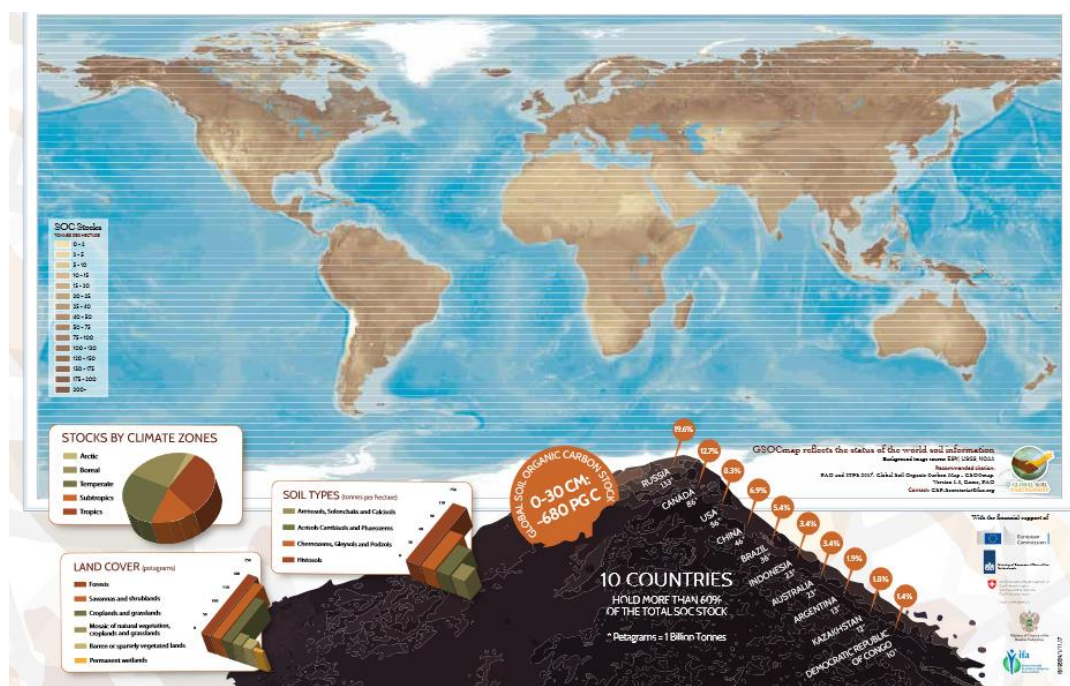
Πηγή: Chapin κ.ά., 2012

Σύμφωνα με το σχήμα της Εικόνας 4, τα φυτά εκτός από την αναπνοή απελευθερώνουν άνθρακα στην ατμόσφαιρα μέσω της καύσης (κυρίως από πυρκαγιές), καθώς και της εκπομπής οργανικών ενώσεων. Τα φυτοφάγα ζώα, επίσης, τροφοδοτούνται από αυτά με άνθρακα. Ωστόσο, το μεγαλύτερο ποσοστό της ένωσης χάνεται από τα φυτά στο έδαφος μέσω φυτικών υπολειμμάτων, εκκρίσεων ενζύμων από τις ρίζες (root exudation<sup>3</sup>) και μικροβίων που ζουν στις ρίζες των φυτών, όπως μυκόριζες, αζωτο-σταθεροποιητικά βακτήρια (Κοτρωνάκης, 2018). Οι μεταφορές άνθρακα που προαναφέρθηκαν από τα φυτά στο έδαφος καταλήγουν στη δημιουργία της οργανικής ύλης του εδάφους (SOM) (Chapin κ.ά., 2012), που

<sup>3</sup> Έκκριση διαλυτών οργανικών ενώσεων από τις ρίζες στο χώμα.

θεωρείται και η δεύτερη μεγαλύτερη φυσική καταβόθρα άνθρακα μετά τους ωκεανούς (ΕΟΠ, 2019γ).

Η οργανική ουσία βρίσκεται συνήθως στα ανώτερα στρώματα του εδάφους (10-40 εκατοστά βάθος), καθώς στο τμήμα αυτό πραγματοποιείται η ανάπτυξη των φυτών και η αποσύνθεση. Η αποσύνθεση της οργανικής ύλης, σύμφωνα με τους Murphy, Stockdale, Poulton, Willison και Goulding (2007) είναι «η μετατροπή της νεκρής οργανικής ύλης σε CO<sub>2</sub> και ανόργανα θρεπτικά συστατικά, αλλά και σύνθετων οργανικών ενώσεων που είναι ανθεκτικές σε περαιτέρω μικροβιακή αποδόμηση (χούμους)». Πραγματοποιείται, κυρίως, από ετερότροφους μικροοργανισμούς, οι οποίοι μετατρέπουν την οργανική ύλη σε CO<sub>2</sub>. Στη συνέχεια, απελευθερώνουν άνθρακα και συμβάλλουν στην κυκλοφορία φυτικών θρεπτικών ουσιών, ιδιαίτερα του αζώτου (N), του θείου (S) και του φωσφόρου (P) στο οικοσύστημα. Βασικοί παράγοντες που επιδρούν στη διαδικασία αυτή είναι η θερμοκρασία, η υγρασία και οι περιβαλλοντικές συνθήκες του εδάφους (Diacono κ.ά., 2010).



Χάρτης 1: Παγκόσμια κατανομή οργανικού άνθρακα  
Πηγή: FAO, 2017

Ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της οργανικής ύλης είναι ότι καθίσταται ρυθμιστής του περιβάλλοντος, γιατί προστατεύει τις λεκάνες απορροής και τα υπόγεια νερά από τα γεωργικά και χημικά απόβλητα. Ακόμη, συσσωρεύει και συγκρατεί πάνω από δύο φορές περισσότερο άνθρακα στο έδαφος απ' ό τι στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας στη μείωση των αερίων θερμοκηπίου. Παρ' όλα αυτά, στις μέρες μας, λόγω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, η ποσότητα άνθρακα που δεσμεύεται ετησίως στα εδάφη είναι τέσσερις φορές μικρότερη από τους 8Gt άνθρακα που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα. Έτσι, αναδεικνύεται και η σημασία της οργανικής ουσίας σε σχέση με τις κλιματικές αλλαγές (Lal, 2004).

## Κεφάλαιο 2: Κλιματική αλλαγή και γεωργία

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει διάφορους τομείς: την κτηνοτροφία, την αλιεία, την υλοτόμηση, ακόμα και την οικονομία μίας χώρας. Ο τομέας, όμως, της γεωργίας είναι αυτός που συνδέεται πιο στενά με το φαινόμενο (ευθύνεται για το 10% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της ΕΕ), καθώς η ανάπτυξή του εξαρτάται άμεσα από παράγοντες, όπως το κλίμα, η θερμοκρασία, οι όμβροι και τα κατακρημνίσματα, η ηλιοφάνεια κλπ (ΕΟΠ, 2015). Μία αλλαγή σε μία από αυτές τις μεταβλητές είναι δυνατόν να προξενήσει σοβαρά προβλήματα, που θα θέσουν σε κίνδυνο τις γεωργικές δραστηριότητες. Ενδεικτικά μπορούν να αναφερθούν:

- Μείωση της αποδοτικότητας (γονιμότητα και ποικιλότητα) και πιθανή πρόκληση καταστροφών στις καλλιέργειες, λόγω της συχνής εμφάνισης ακραίων καιρικών φαινομένων, αυξομειώσεων στη θερμοκρασία κλπ.
- Αύξηση τεχνητής παροχής νερού στα καλλιεργούμενα εδάφη.
- Μείωση της διαθεσιμότητας νερού σε περιόδους ξηρασίας.
- Αύξηση του κινδύνου διάβρωσης των εδαφών από τις συχνές εναλλαγές περιόδων ξηρασίας και βροχών.
- Μεταβολή των ετήσιων κύκλων φυτών και ζώων, οδηγώντας σε μικρότερες σοδειές. Έτσι, η άνοιξη μπορεί να έρχεται νωρίτερα και τα δέντρα να ανθίζουν πριν προλάβουν οι επικονιαστές να μεταφέρουν τη γύρη τους σε άλλα άνθη.
- Πολλαπλασιασμός των ασθενειών, παρασίτων και ζιζανίων από την απότομη άνοδο της θερμοκρασίας ή της υγρασίας.
- Αύξηση της αλατότητας των υπόγειων υδάτων (υφαλμύρωση), εξαιτίας είτε της τεράστιας εκμετάλλευσης των παράκτιων υδροφορέων, είτε της ανόδου της θαλάσσιας στάθμης. Όταν συμβαίνει κάτι από τα δύο, τότε θαλασσινό νερό μπορεί να εισχωρήσει και να διεισδύσει στα υπόγεια ύδατα.

Σε πρόσφατη έκθεση του ΕΟΠ (2019γ), σχετικά με την προσαρμογή της κλιματικής αλλαγής στη γεωργία επισημαίνεται ότι οι συνολικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής θα μπορούσαν να επιφέρουν σημαντική απώλεια, ύψους έως και 16% στα γεωργικά εισοδήματα στην ΕΕ έως το 2050.

Το 2017 απελευθερώθηκαν περίπου 4,5 δισεκατομμύρια τόνοι CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, ποσότητα που προερχόταν αποκλειστικά από την ευρωπαϊκή γεωργία. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> από τυρφώδες έδαφος<sup>4</sup> που αποστραγγίζεται για γεωργικούς σκοπούς στην Ευρώπη αγγίζουν τους 173 Mt CO<sub>2</sub> (ΕΟΠ, 2020), κάνοντάς την το δεύτερο μεγαλύτερο σημείο συγκέντρωσης εκπομπών CO<sub>2</sub> μετά την Ινδονησία (Berge κ.ά., 2017). Στο έδαφος φαίνεται να είναι αποθηκευμένοι περίπου 75 δισεκατομμύρια τόνοι οργανικού άνθρακα, με σχεδόν το μισό των αποθεμάτων

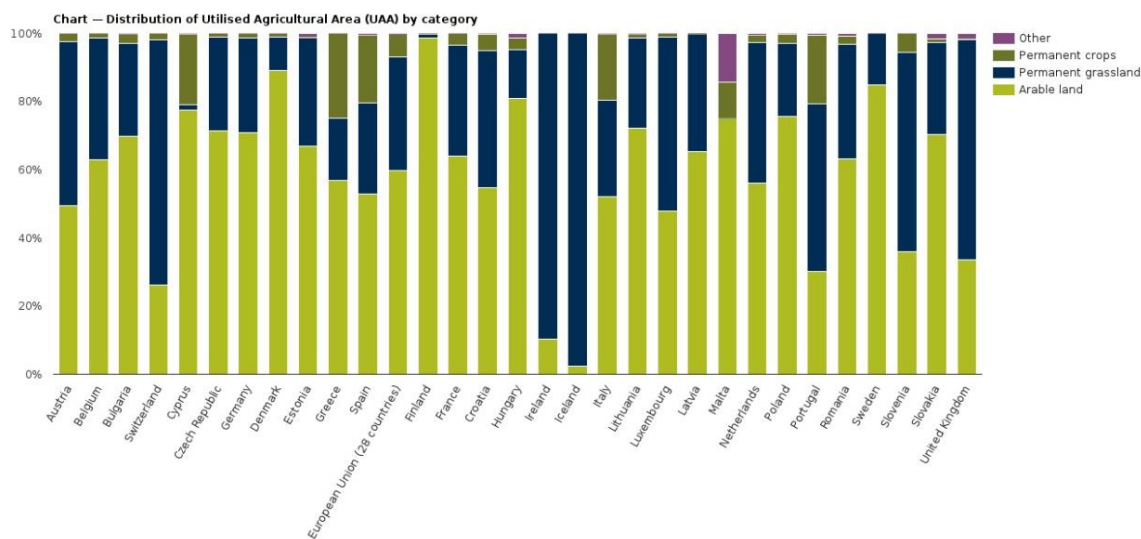
---

<sup>4</sup> Συγκρατεί το νερό και τη θερμότητα, κάτι το οποίο οφείλεται στα μικρά σωματίδια εδάφους. Ένα τυρφώδες έδαφος είναι μέτρια πορώδες.

αυτών να βρίσκονται στη Σουηδία, τη Φινλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Οι χώρες αυτές διαθέτουν περισσότερες δασικές εκτάσεις και κυρίως υγρά οργανικά εδάφη, σε σχέση με τα υπόλοιπα κράτη-μέλη της ΕΕ.

Η περιεκτικότητα των εδαφών σε οργανικό άνθρακα μεταβάλλεται διαρκώς κι επομένως δεν μπορούν να γίνουν σαφείς εκτιμήσεις σχετικά με τον ρυθμό αυτής της αλλαγής. Ενδεχομένως να αυξηθεί σταδιακά με την πάροδο των χρόνων (ΕΟΠ, 2019γ).

Στο πλαίσιο της θεματικής στρατηγικής της ΕΕ για την προστασία του εδάφους, τονίζεται η σημασία των υγιών εδαφών (European Commission, 2012). Στη συμφωνία του Παρισιού επισημαίνεται ο ρόλος των χρήσεων γης στη διαμόρφωση του κλίματος (European Commission, 2015). Σε συνέχεια της συμφωνίας του Παρισιού, ένας νέος κανονισμός της ΕΕ σχετικά με τις χρήσεις γης απαιτεί από τα κράτη-μέλη της να αντισταθμίσουν πλήρως τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου του γεωργικού τομέα από το 2021 έως το 2030 (European Commission, 2018). Με την εφαρμογή του νέου κανονισμού οι χώρες οφείλουν να υποβάλλουν εκθέσεις, τις οποίες διευθύνει ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΟΠ). Ο ΕΟΠ αναπτύσσει με σχετικές γνώσεις περιβαλλοντικά ζητήματα που αφορούν τις χρήσεις γης, καθώς και με σχετικές πρακτικές διαχείρισής της (όπως η χρήση δεδομένων γεωσκόπησης του προγράμματος Copernicus (βλ. Κεφάλαιο 3)) (Copernicus, 2021).



Διάγραμμα 1: Κατανομή των γεωργικών περιοχών που είναι σε χρήση ανά κατηγορία (μόνιμες καλλιέργειες, μόνιμοι βοσκότοποι, καλλιεργήσιμη γη, άλλο)

Πηγή: ΕΟΠ, 2017

## 2.1. Η περίπτωση της Ελλάδας

Στην περίπτωση της Ελλάδας, το 2014-2015 καταγράφηκαν σημαντικά μειωμένες εκπομπές CO<sub>2</sub> στον τομέα της γεωργίας σε σχέση με άλλα ευρωπαϊκά κράτη-μέλη, σύμφωνα με εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας (Eurostat). Ωστόσο, με την πάροδο των χρόνων οι εκπομπές αυτές άρχισαν να

αυξάνονται σταδιακά και το 2018 να σημειώνεται αύξηση έως και 39%, χωρίς αυτό να την κατατάσσει σε υψηλότερη θέση από άλλες χώρες.

Πίνακας 1: Εκπομπές CO<sub>2</sub> (χιλιάδες τόνοι) στο γεωργικό τομέα σε χώρες της ΕΕ (ενδεικτικά μερικές)

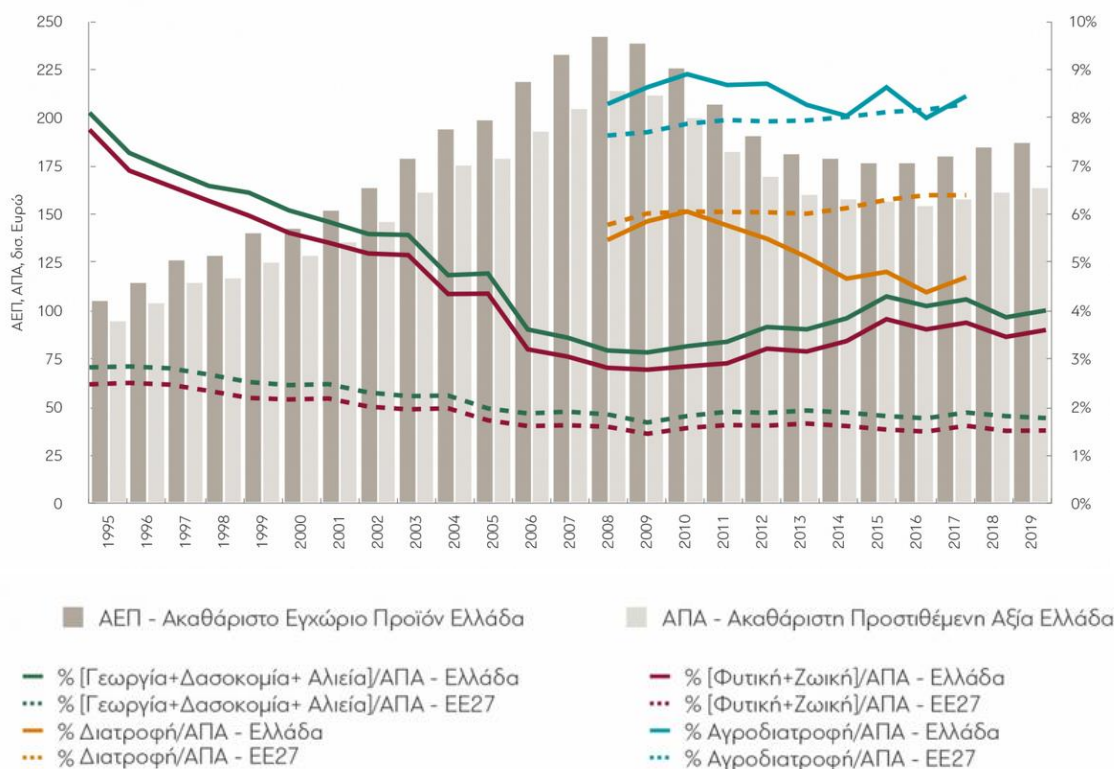
GEO/TIME	2014	2015	2016	2017	2018
Βέλγιο	186,19	188,73	191,12	191,40	190,47
Δανία	240,24	177,45	216,59	219,12	244,18
Γερμανία	2.939,98	3.071	2.772,89	2.924	2.913,82
<b>Ελλάδα</b>	23,64	23,41	26,36	34,14	32,91
Ισπανία	586,43	504,68	509,95	611,08	498,61
Γαλλία	1.962,90	2.003,01	2.013,83	1.943,02	2.018,59
Ιταλία	422,97	438,43	539,35	435,92	420,71
Κύπρος	0,41	0,40	0,39	0,42	0,22
Πορτογαλία	48,01	56,20	55,58	52,65	47,79
Ρουμανία	82,15	94,34	113,24	124,60	125,42
Σουηδία	123,33	124,48	128,12	127,54	128,55
Ισλανδία	4,09	3,79	4,13	3,99	6,42
Αγγλία	1.503,04	1.268,59	1.291,37	1.280,63	1.266,31

Πηγή: Eurostat

Η πανδημία του Covid-19 έχει άμεσες και μακροχρόνιες επιπτώσεις στο σύστημα της αγροδιατροφής<sup>5</sup> σε τοπικό, αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Στην Ελλάδα, ο κορωνοϊός επανέφερε την ελληνική γεωργία σε επίπεδα της περιόδου χρηματοοικονομικής κρίσης του 2008-2018, παρά την ανάκαμψη που είχε σημειώσει ως εκείνο το διάστημα. Η πρωτογενής παραγωγή φαίνεται να μην επηρεάζεται τόσο, όσο άλλοι κλάδοι της οικονομικής δραστηριότητας (υγεία, τουρισμός, εστίαση, μεταφορές), παρά να επιδεικνύει αξιοσημείωτη σταθερότητα (Καραντινίνης, 2020).

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 2, η συμμετοχή της προστιθέμενης αξίας της γεωργίας στην εθνική εγχώρια προστιθέμενη αξία αυξήθηκε κατά μία σχεδόν μονάδα (από 2,82% το 2008 σε 3,6% το 2019). Από την άλλη πλευρά, η συμμετοχή της διατροφής (μεταποίηση, διανομή, εστίαση) μειώθηκε σημαντικά το έτος 2010 (6,1%) δείχνοντας σημεία ανάκαμψης (4,6% το 2017). Το ίδιο συνέβη και με το σύνολο της αγροδιατροφής, όπου το 2017 βρέθηκε στο επίπεδο του 2008 (8,4%).

<sup>5</sup> Το σύνολο της διατροφικής αλυσίδας που ξεκινάει από το χωράφι και καταλήγει στο ράφι, περιλαμβάνοντας διαδικασίες, όπως η παραγωγή, η επεξεργασία και η διάθεση (Μπερτζελέτου, 2016).

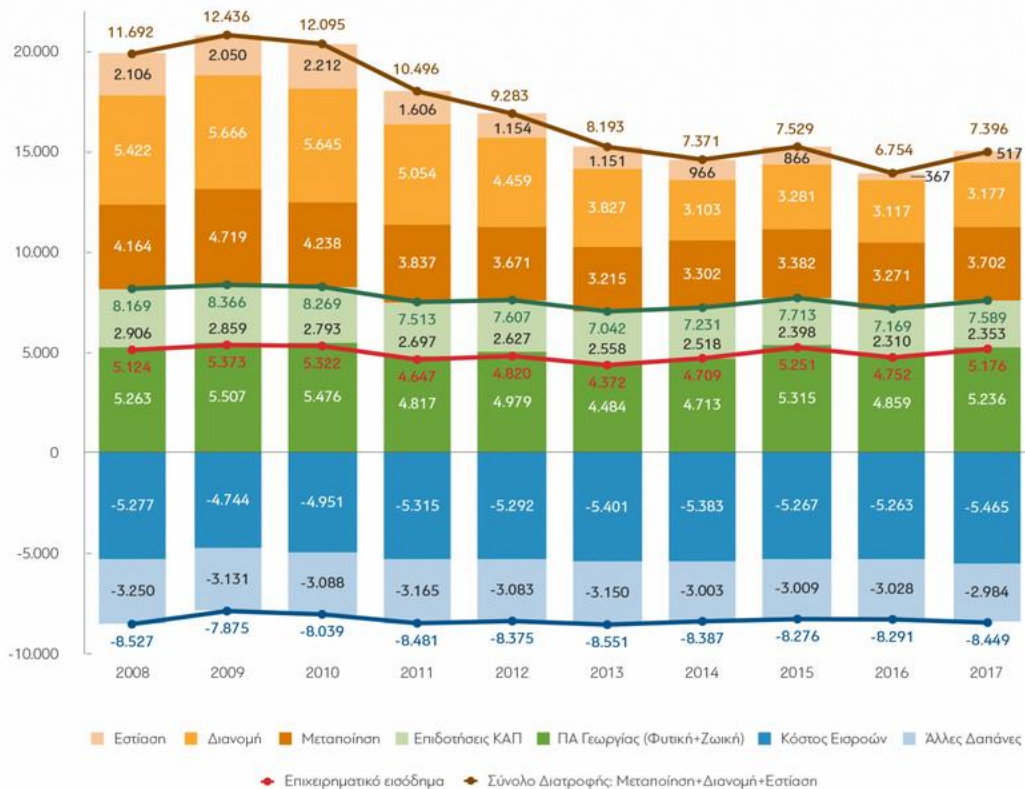


**Διάγραμμα 2: Γεωργία, αγροδιατροφή και ΑΕΠ σε Ελλάδα και ΕΕ (1995-2019)**

Πηγή: Eurostat

Κατά τη διάρκεια της κρίσης (2008-2017), οι γεωργικές εισροές παρουσιάζουν χαμηλή ελαστικότητα (άρα και σταθερότητα) και βρίσκονται μειούμενες μόνο κατά 3,5%, όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 3. Η εστίαση υπέφερε σημαντικά κατά τη διάρκεια της κρίσης, καθώς σημείωσε πτώση έως και 75%. Ακολούθως, η διανομή και μεταποίηση κατάφεραν να αγγίξουν τα ποσοστά των 40% και 10% αντίστοιχα. Την ίδια περίοδο, το κόστος εισροών της γεωργικής παραγωγής αυξήθηκε κατά 5,6%, κυρίως σε ό,τι αφορά την ενέργεια και τις ζωοτροφές, ενώ μειώθηκε κατά 1,4% στους σπόρους, τα λιπάσματα και τα φυτοφάρμακα. Τέλος, τα επιτόκια για τη γεωργία στην Ελλάδα κυμαίνονται από 4 έως 8,5% υψηλότερα σε σχέση με άλλους τομείς. Μάλιστα, είναι από τα υψηλότερα στην ΕΕ.





Διάγραμμα 3: Κατανομή αξίας της αγροδιατροφής στην Ελλάδα (2008-2017)

Πηγή: Eurostat

Η σύγκριση κάποιων κλασμάτων γεωργικών εκμεταλλεύσεων στην Ελλάδα σε σχέση με το σύνολο της ΕΕ θα ήταν χρήσιμη. Έτσι, σύμφωνα με τον Πίνακα 2 γίνεται φανερό ότι το 2017 η συνολική εκμετάλλευση στην Ελλάδα καλύπτει περίπου το 13% της γης στον ελλαδικό χώρο και το 0,4% της Ευρώπης. Ακόμη σχεδόν το 6% της ΕΕ προέρχεται από γεωργικές εκμεταλλεύσεις που αφορούν αποκλειστικά την Ελλάδα.

Πίνακας 2: Σύγκριση κλασμάτων γεωργικών εκμεταλλεύσεων σε Ελλάδα και ΕΕ (2017)

Εκμεταλλεύσεις		
	Ελλάδα	ΕΕ
Αριθμός εκμεταλλεύσεων	632.540	10.655.250
Συνολική κάλυψη γης	4.856.780	157.286.910

Πηγή: Eurostat

Όταν εντάχθηκε η Ελλάδα στην τότε ΕΟΚ το 1981, στη γεωργία απασχολούταν το 30% του εργατικού δυναμικού της χώρας και η γεωργική παραγωγή αποτελούσε το 25% του ΑΕΠ (Καραντινίνης, 2020). Σήμερα, η γεωργία απασχολεί το 12% του εργατικού δυναμικού και συμβάλει κατά 3,6% στην εθνική προστιθέμενη αξία, ποσοστό υψηλότερο σε σχέση με τη συμμετοχή στο ΑΕΠ ολόκληρης της ΕΕ.

Πίνακας 3: Ποσοστά κατανομής γεωργίας σε Ελλάδα και ΕΕ (2019)

Ποσοστά	Ελλάδα	ΕΕ
Γεωργικό εισόδημα	87	45
ΑΕΠ	3,6	1,5
Γεωργοί με μόνο πρακτική εμπειρία	93,9	69,8
Γεωργοί με βασική εκπαίδευση	5,5	20,2
Γεωργοί με πλήρη γεωργική εκπαίδευση	0,6	8,5
Γεωργοί <35 ετών	5,2	6,1

Πηγή: Eurostat

Το γεωργικό εισόδημα στην Ελλάδα εξακολουθεί να είναι συγκρίσιμο με της υπόλοιπης οικονομίας (87%), ενώ στην ΕΕ αποτελεί μόνο το 45%. Είναι, επίσης, σημαντικό να τονιστεί ότι η συντριπτική πλειοψηφία των Ελλήνων γεωργών ασκεί το επάγγελμα χωρίς ιδιαίτερες γνώσεις, με μόνο εφόδιο την πρακτική εμπειρία. Μόλις 5,5% έχουν παρακολουθήσει κάποια βασική εκπαίδευση (έναντι του 20,2% της ΕΕ), ενώ ελάχιστοι είναι αυτοί που έχουν πλήρη γεωργική εκπαίδευση. Οι περισσότεροι από τους γεωργούς είναι ηλικίας άνω των 35 ετών.

## 2.2. Επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών & χρήσεων γης στην οργανική ύλη – Υποβάθμιση του εδάφους

Ο ρυθμός υποβάθμισης του εδάφους είναι πλέον πολύ γρηγορότερος (έως και 100 φορές) από το ρυθμό σχηματισμού νέου εδάφους, εξαιτίας διάφορων ανθρωπογενών παρεμβάσεων. Τέτοιες είναι η χρήση μη βιώσιμων καλλιεργητικών πρακτικών (10-50 φορές περισσότερη ενέργεια για να παράγουν 1 μονάδα ενέργειας από ένα προϊόν κρέατος και 7-10 μονάδες περισσότερη ενέργεια για ένα φυτικό προϊόν), η εξόρυξη ορυκτών καυσίμων, η αποψίλωση των δασών και η αστικοποίηση (Nikolaidis, 2011). Στην Ελλάδα περίπου 255.000 τρακτέρ προκαλούν διάβρωση σε ευπαθή εδάφη (Κοτρωνάκης, 2018).

Η βλάστηση μιας περιοχής θεωρείται σημαντικός παράγοντας ως προς την ποσότητα δέσμευσης του εδαφικού άνθρακα. Για παράδειγμα, οι λειμώνες, οι υγροβιότοποι και οι δασικές εκτάσεις αποτελούν πηγές πλούσιες σε ποσότητες άνθρακα. Οι λιβαδικές εκτάσεις, που παραμένουν στην ίδια κατάσταση για αρκετό καιρό, αποτελούν, επίσης, σημαντική πηγή δέσμευσης οργανική ύλη, αλλά και αζώτου, εξαιτίας της χλωρίδας του μικροβιότοπου (μικροχλωρίδα) και των μακράς διάρκειας καλλιεργειών, που επιτρέπουν την αποθήκευσή τους (μίσχανθος, σύλφιο και μολόχα). Ωστόσο, τα αποθέματα αυτά είναι δυνατόν να τροποποιηθούν αν οι περιοχές αυτές υποστούν μεταβολές, όπως είναι η ερημοποίηση, η αποψίλωση των δασών, η αποστράγγιση των υγρών ζωνών κ.ά. ή εάν τα κλιματικά φαινόμενα μεταβληθούν προκαλώντας προβλήματα στις διάφορες εδαφικές εκτάσεις (πχ. χαλάζι, πυρκαγιά). Χάρη σε αυτά τα αίτια θα επιτευχθεί ταχεία αποδέσμευση του εδαφικού άνθρακα προς την ατμόσφαιρα με τη μορφή CO<sub>2</sub>.



Εικόνες 5: Πολυετείς καλλιέργειες (μίσηανθος, σούλφιο και μολόχα) που δεσμεύουν οργανική ύλη  
Πηγή: Google

Η υποβάθμιση του εδάφους ακολουθεί μια σταδιακή – αύξουσα πορεία. Σε πρώτο στάδιο, περιορίζεται η βλάστηση που προστατεύει το έδαφος. Συνέπεια του περιορισμού αυτού είναι η μείωση της οργανικής ουσίας του εδάφους, η καταστροφή της δομής και γονιμότητάς του, η μείωση της αποδόμησης των ρυπογόνων ουσιών και η απώλεια της βιοποικιλότητας. Σε δεύτερο στάδιο, ακολουθεί η αύξηση της επιφανειακής απορροής, καθώς περιορίζεται η ικανότητα του εδάφους να συγκρατεί νερό κι έτσι διαβρώνονται και υποβαθμίζονται οι εδαφικοί πόροι. Με την εκμηχάνιση της γεωργίας διασπώνται τα συσσωματώματα του εδάφους, ενώ η συνεχής μείωση της υγρασίας του εδάφους μπορεί να εντείνει την ανάγκη άρδευσης στη γεωργία και να οδηγήσει σε μικρότερες σοδειές, ακόμη και σε ερημοποίηση, με πιθανώς δραματικές επιπτώσεις στην παραγωγή τροφίμων (Montanarella κ.ά., 2015).

Η εντατικοποίηση της γεωργικής παραγωγής τα τελευταία χρόνια έχει οδηγήσει στην αντικατάσταση των παραδοσιακών μορφών ήπιας καλλιέργειας, σε συστήματα μονοκαλλιεργειών και σε χρήση μεγάλων ποσοτήτων φυτοπροστατευτικών προϊόντων και ανόργανων εμπορικών λιπασμάτων (50 φορές επιπλέον ποσότητα απ' ότι πραγματικά χρειάζεται), με σκοπό τη μεγιστοποίηση της γεωργικής παραγωγής (Banwart, 2011). Από κλιματολογικής απόψεως, η γεωργική δραστηριότητα αποτελεί πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  και  $\text{N}_2\text{O}$ ), καθώς και πηγή αποθήκευσης άνθρακα στη βιομάζα και στις οργανικές ύλες του εδάφους. Οι εκπομπές  $\text{CO}_2$  προέρχονται από την εντατική χρήση ενέργειας από ορυκτές πηγές (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ηλεκτρική ενέργεια), καθώς και από τις διάφορες διεργασίες που πραγματοποιούνται και εισέρχονται στα γεωργικά εδάφη, όπως οργανικά φυσικά λιπάσματα (πχ. κοπριά), φυτοφάρμακα κ.ά. Μία σταδιακή ή/και απότομη αλλαγή στα αποθέματα άνθρακα που περιλαμβάνονται στις καλλιεργήσιμες εκτάσεις μπορεί, επίσης, να προκαλέσει τη διέγερση  $\text{CO}_2$ . Από την άλλη πλευρά, εκπομπές  $\text{CH}_4$  σημειώνονται είτε κατά την εντερική ζύμωση των μηρυκαστικών ζώων, είτε κατά την αναερόβια ζύμωση ζωικής κοπριάς ή πλημμυρισμένων γεωργικών εκτάσεων, ενώ εκπομπές  $\text{N}_2\text{O}$  παρατηρούνται κατά τη χρήση ορυκτών ή νιτρικών λιπασμάτων. Πέρα από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, συναντώνται και λεπτά σωματίδια, όπως το νιτρικό αμμώνιο ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )

και διάφορα θειικά άλατα, τα οποία έχουν την ιδιότητα να ανακλούν τις ακτίνες του ηλίου προς την ατμόσφαιρα.

Για τη μελλοντική και βιώσιμη ανάπτυξη των οικοσυστημάτων θα πρέπει να πραγματοποιηθούν άμεσα συντονισμένες δράσεις – πρακτικές, με σκοπό τη βελτίωση της οικολογικής ανθεκτικότητας. Παράλληλα, προκειμένου να μην επηρεαστεί η υγεία του πληθυσμού ή να απειληθεί η ασφάλεια των ειδών διατροφής, θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί η γεωργική παραγωγή, διατηρώντας τη βιοποικιλότητα για την ευημερία των ανθρώπων και την οικονομία (Commission of the European Communities, 2006).

### **2.3. Συμβολή της έρευνας στη γεωργία & πρακτικές μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου**

Οι περισσότερες ερευνητικές δραστηριότητες, που λαμβάνουν χώρα στο γεωργικό τομέα, είναι ταξινομημένες σε δίκτυα. Τα δίκτυα, αλλά και τα κατάλληλα εργαλεία εξασφαλίζουν μία επιτυχή και αποτελεσματική έρευνα για την πρόβλεψη των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και των απορροφήσεών τους σε τοπική καθώς και σε παγκόσμια κλίμακα. Ένα από τα πιο γνωστά σε ευρωπαϊκό επίπεδο δίκτυα είναι το ICOS-RI, το οποίο αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης των εκπομπών του CO<sub>2</sub> με ερευνητική υποδομή.

Η γεωργία καθίσταται βασικός παράγοντας μείωσης των εκλυόμενων αερίων, που συμβάλλει στην καταπολέμηση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής κι επηρεάζει και τις εκπομπές αερίων άλλων τομέων. Πιο συγκεκριμένα, στον τομέα των αποβλήτων μέσω του βιοαερίου περιορίζεται η αποδέσμευση των αερίων του θερμοκηπίου. Το βιοαέριο μπορεί να παραχθεί από ακατέργαστες πρώτες ύλες, όπως τα βιολογικά απόβλητα, η κοπριά (αζωτοκαλιούχο λίπασμα), τα λύματα και τα υπολείμματα των καλλιεργειών, σε ωφέλιμο μεθάνιο. Θεωρείται ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία δε συνεισφέρει σημαντικά στην επιδείνωση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής.

Οι καλλιέργειες που ευνοούνται, ιδιαίτερα, από την εφαρμογή της κοπριάς είναι οι σκαλιστικές. Η ντομάτα συγκαταλέγεται μεταξύ των καλλιεργειών που έχουν σημαντικές απαιτήσεις σε άζωτο και κάλιο.

Στον τομέα της βιομηχανικής διεργασίας και ειδικότερα στη σύνθεση και μεταφορά των ορυκτών λιπασμάτων, ελαττώνονται οι εκπομπές μέσω της χρήσης καλλιεργειών που δεσμεύουν το άζωτο στο έδαφος και ανακτούν τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά, όπως ο φώσφορος, το κάλιο κλπ. Οι αζωτοδεσμευτικές καλλιέργειες, όπως τα ψυχανθή, συνίστανται κυρίως από τριφύλλια, μπιζέλια, σόγια, φασόλια και φακές. Τα φυτά αυτά χρησιμοποιούν τα νιτρικά ιόντα, που λαμβάνουν από το έδαφος, ώστε να παρασκευάσουν πρωτεΐνες (αζωτούχες ενώσεις). Στην

Ελλάδα οι εκτάσεις αζωτοδεσμευτικών καλλιεργειών έχουν παραμείνει στα ίδια επίπεδα (σταθερή πορεία) τα τελευταία χρόνια.

Πρακτικές, όπως η τεχνική της μη άροσης (zero tillage), η επιφανειακή άροση (reduced tillage) και η χρήση ζιζανιοκτόνων για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων επισκεπτών στα φυτά, θεωρούνται αποτελεσματικές ως προς τη δέσμευση σημαντικής ποσότητας άνθρακα. Σύμφωνα με μελέτες που διεξήχθησαν σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, προέκυψε ότι σε διάστημα 20 ετών η οργανική ουσία ανήλθε στο 15% στα εδάφη που δεν είχαν υποστεί άροση. Αντιθέτως, εκείνα τα οποία υπέστησαν εντατική άροση διαπιστώθηκε πως είχαν ιδιαίτερα χαμηλά αποθέματα άνθρακα. Ένα επιπλέον όφελος στη γεωργική παραγωγή είναι η αποφυγή χρήσης των μηχανών, που αυτό οδηγεί στην εξοικονόμηση των ενεργειακών πόρων, αλλά και στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών του CO<sub>2</sub>. Μάλιστα, η μείωση των εκπομπών του αερίου φτάνουν έως και το 40% σε εδάφη που υφίστανται περιορισμένη άροση (πχ. καλλιέργειες βαμβακιού), ενώ σε αυτά στα οποία δε χρησιμοποιείται καθόλου αγγίζει έως και το 70%.

Σύμφωνα με τον Eagle (2011), η μετατροπή μίας καλλιεργήσιμης έκτασης που εφαρμοζόταν κανονική άροση σε περιορισμένη κλίμακα, μπορεί να ωφεληθεί κατά 1,06 τόνους CO<sub>2</sub>e το χρόνο και σε μηδενική κατά 1,01 τόνους CO<sub>2</sub>e το χρόνο. Οι Vleeshouwers και Verhagen (2002) έδειξαν παρόμοια αποτελέσματα (εδάφη μετατρέπόμενα σε περιορισμένη άροση έχουν θετικό ισοζύγιο 0,92 τόνους CO<sub>2</sub>e το χρόνο). Οι κατάλληλες κλιματολογικές συνθήκες είναι δυνατόν να συμβάλλουν στην περαιτέρω αύξηση των τόνων του CO<sub>2</sub>e.

Η χρήση ζιζανιοκτόνων, καθώς και βαριών αγροτικών μηχανημάτων δεν προκαλούν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά της άροσης. Αντιθέτως, η διατήρηση των ζιζανίων στις καλλιέργειες μπορεί να αποβεί αποτελεσματική σε σχέση με τις ποσότητες αποθήκευσης οργανικής ύλης. Συγκεκριμένα, σε περιοχές της Νοτίου Ελλάδας, η παρουσία μικροσκοπικών οργανισμών στα ελαιόδεντρα δεσμεύει έως και 7,32 τόνους CO<sub>2</sub>e το χρόνο (Michalopoulos, 2011). Παρόμοια περίπτωση συναντάται και στους ελαιώνες της Ισπανίας. Στην Ιταλία η εφαρμογή γρασιδιού στους αμπελώνες σημειώνει θετικά αποτελέσματα ως προς το μετριασμό της απελευθέρωσης των αερίων του θερμοκηπίου.

Η συνεχής εδαφοκάλυψη (χωρίς να μένει κενό στο έδαφος) είναι μία ακόμα πρακτική, χάρη στην οποία αποφεύγεται η διάβρωση, λόγω κυμάτων, ισχυρών ανέμων ή άλλων φαινομένων και αυξάνεται η ποσότητα οργανικής ουσίας, εξαιτίας της παραγωγής της βιομάζας. Καλύτερα αποτελέσματα σημειώνονται όταν συνδυάζεται με μηδενική άροση. Επίσης, σε περιόδους αγρανάπαυσης τα φυτά προσλαμβάνουν το διαθέσιμο άζωτο που υπάρχει στο έδαφος, ώστε να το αποδώσουν στις επόμενες καλλιέργειες και να μη διαφύγει ως N<sub>2</sub>O.

Η χειρότερη εφαρμογή, που απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες CH<sub>4</sub> και N<sub>2</sub>O και συμβάλει αρνητικά στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, θεωρείται το κάψιμο των αγροτικών υπολειμμάτων. Το κάψιμο ευνοεί, επίσης την απελευθέρωση και άλλων αερίων, όπως είναι οι υδρογονανθράκες, οι αζωτούχες ενώσεις και το τριτοσφαιρικό άζωτο (1,21 τόνοι CO<sub>2</sub>e<sup>6</sup> το χρόνο), ενώ τα αποθέματα άνθρακα μειώνονται σημαντικά. Αντί αυτού, τα αγροτικά υπολείμματα (πχ. φυτικά μέρη από τη συγκομιδή, κομπόστ, λιματολόαση από βιολογικούς καθαρισμούς, κοπριά) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιομάζα, αντικαθιστώντας τα ορυκτά καύσιμα. Η ενσωμάτωσή τους στο έδαφος μπορεί να προκαλέσει ανοδική πορεία στην ποσότητα του άνθρακα (κατά 0,55 τόνους).

Στα μεγάλα αστικά κέντρα, πολλοί παραγωγοί καταφεύγουν σε κάθε είδους υπολείμματα της γεωργικής εκμετάλλευσης, παρασκευάζοντας με αυτά, υπό ελεγχόμενες συνθήκες<sup>7</sup>, λιπαντικά μίγματα (κομπόστ), σε αντικατάσταση της κοπριάς (λόγω έλλειψης αρκετής ποσότητας). Η ποιότητα του κομπόστ εξαρτάται από το είδος της πρώτης ύλης που χρησιμοποιήθηκε και την παραγωγική διαδικασία (Κουκουλάκης κ.ά., 2000). Στην Ελλάδα παράγονται κάθε χρόνο περίπου 5,5 εκ. τόνοι αστικών στερεών αποβλήτων, εκ των οποίων σχεδόν οι 2,5 εκ. τόνοι είναι βιοαπόβλητα. Μόνο ένα μικρό ποσοστό αξιοποιείται μέσω της κομποστοποίησης, ενώ το υπόλοιπο καταλήγει σε ΧΥΤΑ.

Τέλος, η αμειψισπορά έχει αποδειχθεί ως ένας βέλτιστος τρόπος δέσμευσης του άνθρακα στο έδαφος, που εξαρτάται σημαντικά από το είδος της καλλιέργειας (η επίδραση της κάθε καλλιέργειας είναι διαφορετική ως προς την ποσότητα άνθρακα που αποθηκεύεται στο έδαφος), τη μάζα των υπολειμμάτων, την ταχύτητα αποσύνθεσης, τη διαθεσιμότητα νερού στο έδαφος κ.ά. Η αμειψισπορά καλλιεργειών σίτου μπορεί να προσφέρει έως και οχτώ φορές περισσότερο άνθρακα στο έδαφος απ' ό,τι η μονοκαλλιέργειά του. Οι ποσότητες φαίνεται να αυξάνονται σε περίπτωση χρήσης μηδενικής άρωσης.

Σημαντικός στόχος της γεωργίας είναι να καταφέρει να μεταστρέψει την υφιστάμενη οικονομία, που βασίζεται στη χρήση των ορυκτών καυσίμων σε μία οικονομία «πράσινη», γνωστή με την ονομασία κυκλική οικονομία. Η ιδανική αυτή οικονομία αποτελεί ένα οικονομικό μοντέλο του μέλλοντος, που προϋποθέτει σύγχρονους τρόπους παραγωγής, σύλληψης και κατανάλωσης (όπως η ανακύκλωση των αγαθών), καθώς και την ενεργό συμμετοχή όλων (πολίτες, επιχειρήσεις, δημοτικές και τοπικές κοινότητες) (Christophe, 2016). Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος μίας τέτοιας οικονομίας, η γεωργική έρευνα οφείλει να διερευνήσει και να

---

<sup>6</sup> Το ισοδύναμο του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>e) είναι ένα μέτρο, το οποίο ανάγει τα διαφορετικά αέρια του θερμοκηπίου στην ίδια μονάδα μέτρησης (μονάδα CO<sub>2</sub>), ώστε να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

<sup>7</sup> Αναπτύσσονται θερμοκρασίες κατάλληλες για θερμοφίλα βακτήρια.

σχεδιάσει συστήματα παραγωγής, στηριζόμενα στη βιώσιμη ανάπτυξη και να εισάγει νέα είδη καλλιεργειών, λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, φιλικών προς το περιβάλλον ενισχύοντας και άλλους τομείς (πχ. τον ενεργειακό). Οι «πολυετείς ενεργειακές καλλιέργειες δευτέρας γενιάς» (SGEC), όπως ονομάζονται, αναμένεται σύντομα να πολλαπλασιαστούν, αλλάζοντας τις χρήσεις γης των αρόσιμων εκτάσεων.

Για να τεθούν σε εφαρμογή τα παραπάνω και για να υπάρξουν θετικά αποτελέσματα, κρίνεται απαραίτητο οι γεωργοί να διαθέτουν την καλύτερη δυνατή γνώση σχετικά με τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και τους τρόπους δέσμευσής τους στο έδαφος. Επίσης, η ενεργός συμμετοχή τους σε δράσεις που έχουν σα βασικό στόχο το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, θα ήταν ωφέλιμη.

### **Κεφάλαιο 3: Σύγχρονες τεχνολογίες αποτίμησης στην κλιματική αλλαγή**

Η σημερινή εποχή χαρακτηρίζεται ως εποχή της πληροφορίας. Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησε στην οργάνωση μεγάλων πληροφοριακών βάσεων, που περιλάμβαναν όχι μόνο την περιγραφική πληροφορία, αλλά και τη χωρική (γεωγραφική θέση), καθώς και στην παρατήρηση του πλανήτη Γη από ψηλά για τη μελέτη της ατμόσφαιρας, των ωκεανών, αλλά και την ανίχνευση διάφορων φυσικών φαινομένων. Ένα από αυτά είναι το παγκόσμιο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Προκειμένου οι επιστήμονες να καταγράψουν τυχόν μεταβολές της γήινης επιφάνειας, εξαιτίας της απότομης μεταβολής του κλίματος, κρίθηκε απαραίτητη η αποτύπωσή τους σε χάρτες. Επίσης, η λήψη φωτογραφιών με τη βοήθεια των δορυφόρων θα προσέφερε περεταίρω πληροφορίες σχετικά με τις αλλαγές που μπορεί να έχουν επέλθει. Οι επιστήμες που ασχολούνται με αυτά τα αντικείμενα είναι η Γεωγραφία με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, η Τηλεπισκόπηση, η Μετεωρολογία και τα Συστήματα Εντοπισμού Θέσης.

#### **3.1. Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών**

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ο συνήθης αγγλικός όρος που αποδίδεται σε αυτά είναι Geographical Information Systems (GIS)) είναι μία ειδική μορφή πληροφοριακού συστήματος, που διευθετεί γεωγραφικές πληροφορίες. Συγκεκριμένα, πρόκειται για «ένα σύνολο υλικού, λογισμικού και διαδικασιών, το οποίο με την κατάλληλη χρήση υποστηρίζει τη συλλογή, διαχείριση, ανάλυση, μοντελοποίηση και παρουσίαση δεδομένων με χωρική αναφορά. Αποτελεί, επίσης, σημαντικό εργαλείο υποστήριξης λήψεως αποφάσεων στην επίλυση ποικίλων προβλημάτων διαχείρισης και σχεδιασμού» (Χαλκιάς, 2011).

Τα δεδομένα των ΣΓΠ οργανώνονται και ταξινομούνται σε πληροφοριακά επίπεδα (γνωστά και ως layers) ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή, και

περιλαμβάνουν είτε δεδομένα στην αρχική τους μορφή (πρωτογενή), όπως τοπογραφικές μετρήσεις, είτε δεδομένα που έχουν υποστεί κάποιου είδους επεξεργασία (δευτερογενή). Στην τελευταία κατηγορία δευτερογενείς επεξεργασίες μπορεί να έχουν επιδεχθεί η κλίση, ο προσανατολισμός και η έκθεση του ανάγλυφου, τα είδη βλάστησης, διάφοροι τύποι εδαφών κ.ά. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η αξιοποίησή τους και συνδυαστικά (ενώνοντας layers, που το καθένα περιέχει διαφορετική πληροφορία (π.χ. χρήσεις γης το ένα, υδρογραφικό δίκτυο το άλλο κ.ο.κ.)), κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη ενός κοινού γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς, δηλαδή ενός «πλασίου παραμέτρων και συστημάτων συντεταγμένων που συνδέεται με μία συγκεκριμένη περιοχή και ως προς το οποίο καθορίζονται οι θέσεις σημείων και αντικειμένων της φυσικής γήινης επιφάνειας» (Παράσχος, 2012). Στην Ελλάδα το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς, που χρησιμοποιείται για κάθε χαρτογραφική μελέτη από το 1990 μέχρι σήμερα, είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 (ΕΓΣΑ '87).

Τα οφέλη που προσφέρονται στο χρήστη μέσα από την εφαρμογή των ΣΓΠ είναι ποικίλα και προσοδοφόρα. Τα ΣΓΠ συμβάλλουν στη λήψη ορθότερων και αντικειμενικότερων αποφάσεων, εφόσον υπάρχουν οι σχετικές πληροφορίες. Χάρη σε αυτά, ακόμη, τα γεωχωρικά δεδομένα αναθεωρούνται, αναλύονται και αναπαριστώνται με ευκολία, ενώ η εξαγωγή κι ο διαμοιρασμός τους επιτυγχάνεται ελεύθερα, χωρίς την καταβολή κάποιου χρηματικού ποσού (βέβαια σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχουν και εξαιρέσεις). Ειδικά, στον τομέα της δασοπονίας, όπου τα δασικά οικοσυστήματα εμφανίζουν συνεχή μεταβλητότητα, δεν είναι εύκολη η συνεχής παρακολούθηση και καταγραφή των μεταβολών τους από ειδικό προσωπικό που παρευρίσκεται στα εν λόγω σημεία, καθώς δαπανάται σημαντικό κόστος, αλλά και χρόνος. Συνεπώς, η αυτοματοποιημένη χαρτογραφία (ευκολία δημιουργίας εναλλακτικών χαρτογραφικών επιλογών, ευκολία παραγωγής 3D διαγραμμάτων κ.ά.) επιτρέπει την κατασκευή χαρτών σε συντομότερο χρονικό διάστημα με μικρότερο κόστος, οι οποίοι ενημερώνονται και αναθεωρούνται ανά τακτά διαστήματα. Επιπρόσθετα, τα γεωχωρικά δεδομένα διατηρούνται σε ψηφιακή μορφή και αξιοποιούνται από διαφορετικές πηγές – όργανα, με αποτέλεσμα να καταλαμβάνουν μικρό χώρο και να είναι εύχρηστα. Τα όργανα αυτά πραγματοποιούν διάφορες μορφές επεξεργασίας, όπως τοπογραφικές μετρήσεις, χαρτογραφικές επικαλύψεις, μετατροπές ενός συστήματος συντεταγμένων σε άλλο κλπ.

Τα ΣΓΠ είναι μία τεχνολογία πληροφορικής, η οποία χρησιμοποιείται από διάφορα επιστημονικά πεδία, που ασχολούνται είτε με τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος το χώρο, είτε με τη συλλογή, οργάνωση και επεξεργασία χωρικών δεδομένων, είτε ακόμα και με συγκεκριμένες εφαρμογές. Ορισμένα από τα σημαντικότερα επιστημονικά πεδία είναι: η Γεωγραφία, η Χαρτογραφία, η Τηλεπισκόπηση, το Σύστημα Παγκόσμιου Εντοπισμού Θέσης, η Τοπογραφία, η Φωτογραμμετρία, τα Μαθηματικά και η Στατιστική.



Πιο αναλυτικά, βασικό αντικείμενο της Γεωγραφίας είναι η κατανόηση του χώρου και της θέσης του ανθρώπου πάνω σε αυτόν. Αυτοί ακριβώς είναι και οι λόγοι με τους οποίους μπορεί να εξηγηθεί πώς συνδέεται η επιστήμη αυτή με τα ΣΓΠ (ιδιαίτερα σε θέματα σχεδιασμού, ανάλυσης και εφαρμογών). Η Χαρτογραφία ασχολείται με την απεικόνιση χωρικών δεδομένων μέσα από την κατασκευή χαρτών, οι οποίοι είναι προϊόν ενός ΣΓΠ. Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης είναι μία τεχνική απόκτησης πληροφοριών από απόσταση με τη βοήθεια, κυρίως, των δορυφόρων. Οι πληροφορίες αυτές είναι συνεχώς ενημερωμένες, αφού λαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, λεπτομερείς, χωρίς ιδιαίτερα μεγάλο κόστος και ενσωματώνονται στα γεωχωρικά δεδομένα ενός ΣΓΠ, ώστε να παραχθεί ένας χάρτης. Το Σύστημα Παγκόσμιου Εντοπισμού Θέσης, γνωστό και ως GPS (Global Positioning System) παρέχει ακριβή εντοπισμό της θέσης ενός ανθρώπου ή ενός αντικειμένου πάνω στη γήινη επιφάνεια, μέσω σημάτων που εκπέμπονται από δορυφόρους και λαμβάνονται από ειδικούς δέκτες, οι οποίοι παρέχουν δεδομένα σημαντικής ακρίβειας (Χαλκιάς, 2011). Τα δεδομένα αυτά, στη συνέχεια, μπορούν να αξιοποιηθούν με τα ΣΓΠ, παρέχοντας άμεσα πληροφορίες σχετικά με τη θέση. Η επιστήμη της Τοπογραφίας μελετά τις μεθόδους απεικόνισης και αποτύπωσης των χαρακτηριστικών της γήινης επιφάνειας ή άλλων ουράνιων σωμάτων (πλανητών, δορυφόρων ή αστεροειδών), που είναι είτε φυσικές, είτε διαμορφωμένες από ανθρώπινα έργα (πχ. κτίρια). Η Φωτογραμμετρία αποτελεί μία ιδιαίτερη τεχνική προσδιορισμού των διαστάσεων των αντικειμένων με τη χρήση αεροφωτογραφιών, παρέχοντας ακριβείς μετρήσεις. Ένα από τα παράγωγά της είναι τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (ΨΜΕ), τα οποία περιέχουν σημαντική γεωγραφική πληροφορία σ' ένα ΣΓΠ, όπως το υψόμετρο, η κλίση κ.ά. Τα Μαθηματικά και η Στατιστική, καθώς και άλλοι κλάδοι αυτών (πχ. αναλυτική γεωμετρία) χρησιμοποιούνται στα ΣΓΠ στο σχεδιασμό του συστήματος, στην ανάλυση χωρικών δεδομένων, αλλά και στην εκτίμηση των σφαλμάτων τους.

Τα ΣΓΠ χρησιμοποιούνται σε πολλαπλά πεδία εφαρμογών, αφού είναι μια τεχνολογία, η οποία προσφέρει λύσεις σε διάφορα προβλήματα διαχείρισης του χώρου. Οι εφαρμογές αυτές υλοποιούνται είτε από μεγάλους οργανισμούς, είτε από μικρότερους ανεξάρτητους φορείς και ερευνητές. Ενδεικτικά, κατατάσσονται σε βασικές κατηγορίες, που έχουν σχέση με το περιβάλλον, την κοινωνία, την οικονομία και τη διαχείριση. Στις περιβαλλοντικές εφαρμογές δημιουργούνται βάσεις περιβαλλοντικών δεδομένων σε τοπικό, εθνικό ή παγκόσμιο επίπεδο, χρησιμοποιώντας χάρτες μικρής και μέσης κλίμακας, καθώς και τεχνικές επίθεσης χαρτών, συνδυάζοντας και δορυφορικές εικόνες για τη διαχείριση των φυσικών πόρων και τις αναλύσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι γεωεπιστήμες, η δασοπονία, οι φυσικές καταστροφές, η οικολογία κ.ά. Στις κοινωνικο-οικονομικές εφαρμογές σχεδιάζονται χάρτες μεγάλης ή μεσαίας κλίμακας για εφαρμογές διαχείρισης του κτηματολογίου, της

εγκληματικότητας, της αγοράς, των επιστημών υγείας κλπ, ενώ στις εφαρμογές διαχείρισης υπηρεσιών παράγονται χάρτες, κυρίως, μεγάλης κλίμακας για την τοπική αυτοδιοίκηση, το χωροταξικό – πολεοδομικό σχεδιασμό, τις μεταφορές κ.ά.

Βασικό χαρακτηριστικό ενός ΣΓΠ είναι οι λειτουργίες ανάλυσης, οι οποίες αναδεικνύουν τις σημαντικές δυνατότητές του και αξιοποιούν τόσο τη χωρική, όσο και την περιγραφική διάσταση της γεωγραφικής πληροφορίας. Προκειμένου να δημιουργηθεί και να καθοριστεί με αποτελεσματικότητα ένα ΣΓΠ, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες λειτουργίες, αξιοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο δίνονται απαντήσεις σε ερωτήματα εντοπισμού (αναζήτηση του υψομέτρου), ιδιότητας, τάσεων (πχ. ψηφιοποίηση της ακτογραμμής), διαδρομών, μορφών ή τύπων (χωρική κατανομή οντοτήτων), καθώς και μοντέλων, τα οποία τίθενται. Τέτοια ερωτήματα, για παράδειγμα, μπορεί να είναι: *Ποια είναι η έκταση της οντότητας Α; Τι είναι το αντικείμενο Β; Ποια είναι η συντομότερη οδός από το αντικείμενο Γ στο Δ; Πόσες και ποιες οντότητες Ε υπάρχουν σε απόσταση Ζ από το σημείο Γ;* (Χαλκιάς, 2007). Για την απάντηση των προηγούμενων ερωτημάτων, αλλά και πολλών άλλων είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει πλήθος λειτουργιών ανάλυσης, καθώς και να πραγματοποιηθεί ο κατάλληλος συνδυασμός τους, ώστε να παραχθούν σωστά αποτελέσματα.

Διάφορες ταξινομήσεις λειτουργιών ανάλυσης ενός ΣΓΠ έχουν προταθεί. Το 1991 οι Maguire και David πρότειναν 9 κατηγορίες αναλυτικών λειτουργιών:

- Εισαγωγής δεδομένων. Ανήκουν οι λειτουργίες που έχουν σχέση με την ψηφιοποίηση, τις τεχνικές αξιοποίησης σαρωμένων χαρτών και την εισαγωγή δεδομένων από δορυφορικές εικόνες.
- Τροποποιήσεων μορφής δεδομένων. Εξυπηρετούν την επικοινωνία λογισμικών και εφαρμογών και χρησιμοποιούν δεδομένα από διαφορετικές πηγές.
- Τροποποιήσεων – αναθεωρήσεων – ελέγχου δεδομένων. Διασφαλίζουν την ποιότητα των παραγόμενων δεδομένων.
- Αποθήκευσης και δημιουργίας διαφόρων δομών δεδομένων. Διευκολύνουν αναλυτικές διαδικασίες, όπως είναι η μετατροπή δεδομένων από διανυσματική σε ψηφιδωτή μορφή ή το αντίστροφο.
- Γενίκευσης. Χρησιμοποιείται σε διάφορες χαρτογραφικές και αναλυτικές διαδικασίες (πχ. απλοποίηση γραμμικού διανύσματος)
- Γεωμετρικών μετασχηματισμών. Προσαρμόζουν τα δεδομένα σ' ένα σύστημα αναφοράς ή τα μετατρέπουν σ' ένα άλλο.
- Δημιουργίας ερωτημάτων. Χρησιμοποιούν στοιχεία της βάσης περιγραφικών και χωρικών δεδομένων.

- Ανάλυσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας είναι η χαρτογραφική επίθεση θεματικών επιπέδων, οι στατιστικές επεξεργασίες και η δημιουργία χωρικών δεδομένων.
- Παρουσίασης. Παράγουν χάρτες, γραφήματα και στατιστικά διαγράμματα.

Μία άλλη προσπάθεια ταξινόμησης των λειτουργιών ανάλυσης αφορά τις βασικές διαστάσεις (χωρική και περιγραφική) των γεωγραφικών δεδομένων. Με βάση αυτές διακρίνονται τρεις κατηγορίες λειτουργιών: συντήρησης και ανάλυσης χωρικών δεδομένων, συντήρησης και ανάλυσης περιγραφικών δεδομένων και σύνθετη ανάλυση χωρικών και περιγραφικών δεδομένων. Η πρώτη κατηγορία σχετίζεται με τους μετασχηματισμούς, τις διορθώσεις, τις τροποποιήσεις και τον προσδιορισμό ακριβείας χωρικών δεδομένων. Σ' αυτήν ανήκουν οι μετασχηματισμοί μορφής (μετατροπές από ένα σύστημα σ' ένα άλλο π.χ. διανυσματικά σε ψηφιδωτά δεδομένα), γεωμετρικοί μετασχηματισμοί (απευθείας γεωαναφορά των δεδομένων σ' ένα σύστημα αναφοράς ή μετασχηματισμός τους σ' ένα άλλο), μετασχηματισμοί προβολής (προσαρμογή των δεδομένων σε μία χαρτογραφική προβολή με βάση κάποιο σύστημα αναφοράς), η συντήρηση – ενημέρωση (εισαγωγή, τροποποίηση και διαγραφή χαρακτηριστικών χωρικής διάστασης) και η γενίκευση (μείωση του πλήθους των στοιχείων για την αναπαράσταση μίας γεωγραφικής οντότητας).

Οι λειτουργίες συντήρησης και ανάλυσης περιγραφικών δεδομένων αφορούν την ενημέρωση (με σύνδεση δύο πινάκων περιγραφικών δεδομένων με βάση ένα κοινό πεδίο), ανάκτηση (διεξαγωγή σύνθετων ερωτημάτων (queries)), εξέταση, ακόμα και την αλλαγή των περιγραφών. Έτσι, νέες μπορεί να προστεθούν και παλιές να διαγραφούν. Στην τελευταία κατηγορία, στην οποία συνδυάζονται χωρικά και περιγραφικά δεδομένα, ανήκουν οι:

- Λειτουργίες ανάκτησης. Επιλογή δεδομένων, διαχείριση και τελική ανάδειξή τους.
- Λειτουργίες ταξινόμησης δεδομένων. Κατηγοριοποίηση των δεδομένων σε κλάσεις.
- Μετρητικές λειτουργίες. Καθορισμός απόστασης μεταξύ σημείων, μέτρηση μήκους γραμμών, περιμέτρου ή εμβαδού πολυγώνων, καθώς και του πλήθους των οντοτήτων με κάποιες ιδιότητες.
- Λειτουργίες επίθεσης δεδομένων. Αριθμητικές πράξεις μεταξύ των τιμών του ενός επιπέδου με αυτές ενός άλλου στην αντίστοιχη θέση ή λογικές συνθήκες (True/ False) για την ανάδειξη θέσεων.
- Λειτουργίες γειτονίας. Εκτίμηση των χαρακτηριστικών μίας περιοχής, που περιβάλλει μία θέση. Η υποκατηγορία αυτή περιλαμβάνει τις λειτουργίες αναζήτησης, τις λειτουργίες σημείο – γραμμή σε πολύγωνο (προσδιορισμός σημείων ή γραμμών, που περιέχονται σ' ένα πολύγωνο), τις τοπογραφικές λειτουργίες, τις λειτουργίες παρεμβολής (αξιοποίηση γνωστών τιμών ενός

γεγονότος, που μεταβάλλεται με συνεχή τρόπο σε συγκεκριμένες θέσεις για την πρόβλεψη των τιμών του σε γειτονικές), τις λειτουργίες δημιουργίας πολυγώνων Thiessen, καθώς και τις λειτουργίες δημιουργίας περιμετρικών ζωνών (buffer zones).

Τα αντιπροσωπευτικότερα παραδείγματα λειτουργιών ανάλυσης, που χρησιμοποιούνται συχνά στα ΣΓΠ, είναι: η απλοποίηση/ εξομάλυνση γραμμής, η συγχώνευση (dissolve), η αποκοπή (clip), η δημιουργία υψομετρικών ζωνών, η δημιουργία χαρτών ορατότητας, οι τοπογραφικές τομές, ο υπολογισμός κλίσεων κ.ά.

Τα ΣΓΠ αποτελούν σημαντικό εργαλείο αντιμετώπισης προβλημάτων και διαχείρισης φυσικών καταστροφών, εστιάζοντας σε μία ή περισσότερες φυσικές καταστροφές, ανάλογα με το σκοπό του συστήματος και την περιοχή εφαρμογής τους. Παράλληλα, προσφέρουν τη δυνατότητα δημιουργίας μοντέλων πρόγνωσης και αξιολόγησης του κινδύνου εμφάνισης μίας καταστροφής, μοντέλων προσομοίωσης των επιπτώσεων, που μπορεί να παρουσιάζει, καθώς και σχεδίων εκκένωσης περιοχών, όπου κρίνεται απαραίτητο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα προγράμματα, που έχουν αναπτυχθεί, για την αντιμετώπιση των σεισμών σε χώρες, οι οποίες έχουν πληγεί στο παρελθόν από μεγάλες καταστροφές του φυσικού αυτού φαινομένου. Συγκεκριμένα, το πρόγραμμα HAZUS, που έχει αναπτυχθεί στις ΗΠΑ, περιλαμβάνει μία καθορισμένη μεθοδολογία πρόβλεψης των απωλειών, εξαιτίας του σεισμού και έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε ολόκληρη την έκταση των Ηνωμένων Πολιτειών. Το πρόγραμμα αυτό λειτουργεί σε περιβάλλον MapInfo ή ArcView κι έχει τη δυνατότητα να παράγει προβλέψεις απωλειών, υπολογίζοντας πιθανές ζημιές σε κτίρια, ενδεχόμενες απώλειες ανθρώπινων ζώων, οικονομικές απώλειες, τις ανάγκες για προσωρινά καταφύγια, αλλά και τα ερείπια. Το ίδιο πρόγραμμα έχει αρχίσει να εφαρμόζεται και για την ανίχνευση καταστροφών, που έχουν προκληθεί από πλημμύρες ή τυφώνες.

Αντίστοιχα προγράμματα χαρτογραφικής απεικόνισης λειτουργούν και για την ανίχνευση – επιδείνωση της κλιματικής αλλαγής σε διάφορες περιοχές του πλανήτη. Το πρόγραμμα ClimaTree στοχεύει στην ανάπτυξη μίας νέας μεθοδολογίας και αποτελεί ένα καινοτόμο εργαλείο για τον ποσοτικό προσδιορισμό του εδαφικού άνθρακα σε μόνιμες δεντροκαλλιέργειες, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα και τους στόχους της Σύμβασης του Κιότο, καθώς και άλλων συναφών πολιτικών συμβάσεων – στρατηγικών, όπως τη στρατηγική «Ευρώπη 2020».



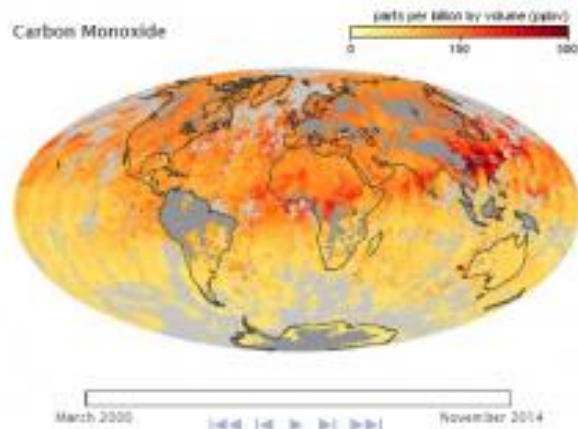
Εικόνα 6: Το λογότυπο του προγράμματος ClimaTree  
Πηγή: [lifeclimatree.eu](http://lifeclimatree.eu)

Άλλα χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η «πλανητική» μηχανή αναζήτησης της Google (Google Planetary Earth Engine), η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (NASA), το Surging Sea Map και οι χάρτες εκπομπών άνθρακα με την τεχνική του χαρτογράμματος. Με το Google Planetary Earth Engine, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις δορυφορικές εικόνες Landsat, αναδύονται χάρτες που αποτυπώνουν την κλιματική αλλαγή με το πέρασμα των χρόνων (πχ. δείχνει την πόλη της ερήμου, το Ντουμπάι πως έχει εξελιχθεί σε μία μεγαλούπολη), εξαιτίας κυρίως των ανθρώπινων επεμβάσεων. Παρόμοια εφαρμογή (με τη χρήση εικόνων Landsat) έχει θέσει σε λειτουργία και η ESRI (Environmental Systems Research Institute), αναρτώντας στο διαδίκτυο χαρακτηριστικές περιπτώσεις μεταβολής του κλίματος με τίτλο “Human activities are reshaping Earth’s surface” (ESRI, 2017).



Χάρτης 2: Το Εθνικό Πάρκο Westland Tai Routini στις δυτικές ακτές της Νέας Ζηλανδίας  
Πηγή: Google Planetary Earth Engine

Η NASA, με τη βοήθεια και της Τηλεπισκόπησης, δημιουργεί παγκόσμιους χάρτες, απεικονίζοντας τις τραγικές συνέπειες της μεταβολής του κλίματος. Κάθε μήνα παρακολουθεί τη θερμοκρασία της γήινης επιφάνειας, τις χιονοπτώσεις, το μονοξείδιο του άνθρακα κ.ά., ώστε να κατανοήσει ο χρήστης πώς –λειτουργεί- ο πλανήτης σε καθένα από αυτά τα χαρακτηριστικά.



**Χάρτης 3: Η κλιματική αλλαγή με την επίδραση του μονοξειδίου του άνθρακα**  
 Πηγή: NASA

Το *Surging Sea Map* παρουσιάζει δύο πιθανά σενάρια που θα συμβούν στο μέλλον. Με βάση το πρώτο εξ αυτών, αποτυπώνεται ένας μελλοντικός χάρτης μίας περιοχής, σύμφωνα με τα σημερινά επίπεδα της θαλάσσιας στάθμης. Στο δεύτερο σενάριο δημιουργείται ένας χάρτης με βάση το επίπεδο της θαλάσσιας στάθμης ανάλογα με τη συνολική ποσότητα άνθρακα που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα.



**Χάρτης 4: Οι περιοχές γύρω από το Τόκιο της Ιαπωνίας με βάση το πρώτο σενάριο**  
 Πηγή: *Surging Sea Map*

Οι χάρτες εκπομπών άνθρακα με την τεχνική του χαρτογράμματος, απεικονίζουν διάφορου είδους δεδομένα, τα οποία αμβλύνουν το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής. Κάθε χαρτόγραμμα παραμορφώνεται, ώστε να αντικατοπτρίζει ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων (οι υψηλές τιμές διογκώνουν τις περιοχές, ενώ οι χαμηλές τους προκαλούν σμίκρυνση). Άλλες εφαρμογές – προγράμματα, όπως το ESRI Global Footprint, το πρόγραμμα «απομάκρυνσης των παγετώνων», της National Geographic για τη θαλάσσια στάθμη κ.ά. θεωρούνται εξίσου σημαντικές για την πρόγνωση – κλιμάκωση της κλιματικής αλλαγής.

Εξαιτίας της ραγδαίας ανάπτυξης της τεχνολογίας, καταστάθηκε επιτακτική η ανάγκη αποτύπωσης – διάθεσης χαρτών, που παρέχονται από τα ΣΓΠ, μέσω του διαδικτύου (Web GIS) σε χρήστες διαφορετικής επαγγελματικής κατάρτισης.

Πρόκειται για μία απλή χαρτογραφική υπηρεσία, χάρη στην οποία οι χρήστες με τη βοήθεια του κέρσορα μπορούν να επιλέξουν διάφορες ιδιότητες, παράγοντας ένα χάρτη με βάση τα δεδομένα αυτά. Το Web GIS δίνει έμφαση σε πτυχές επεξεργασίας γεωδεδομένων, οι οποίες συνδέονται στενά με το σχεδιασμό (πχ. απόκτηση – αποθήκευση δεδομένων, αρχιτεκτονική λογισμικού).

### 3.2. Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση (remote sensing) είναι μία επιστήμη ευρέως διαδεδομένη, εξαιτίας των συνεχώς εξελισσόμενων συστημάτων τεχνολογίας της, αλλά και των διαθέσιμων εφαρμογών της, που συνδέονται στενά με την επιβίωση της ανθρώπινης ύπαρξης. Τις τελευταίες δεκαετίες οι επιστήμονες προσπαθούν να αναζητήσουν έμμεσους τρόπους παρατήρησης, καταγραφής και αξιολόγησης στοιχείων από απόσταση, οι λεγόμενοι τηλεμέθοδοι, που είναι βασισμένοι σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες και σε διαφορετικούς εποχιακούς ή/και ετήσιους χρόνους.

Ποικίλοι ορισμοί έχουν προταθεί για τη συγκεκριμένη επιστήμη. Ο πιο ευρύς και παγκοσμίως αναγνωρισμένος είναι των Avery και Berlin (1992), οι οποίοι ορίζουν την τηλεπισκόπηση ως «τεχνική απόκτησης πληροφοριών για αντικείμενα που βρίσκονται στη γήινη επιφάνεια, μέσα από την ανάλυση δεδομένων που συλλέγονται από ειδικά όργανα, τα οποία όμως δεν έχουν φυσική επαφή με τα αντικείμενα. Συνεπώς, η τηλεπισκόπηση μπορεί να αποδοθεί και ως η αναγνώριση ενός αντικειμένου από απόσταση». Επίσης, η επιστήμη αυτή μπορεί να συμπεριλάβει και ηχητικά κύματα, που εκπέμπονται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και εντοπίζονται από ειδικούς αισθητήρες, το σόναρ για τον προσδιορισμό του βάθους του πυθμένα της θάλασσας, το υπερηχογράφημα και τις ακτινογραφίες, που χρησιμοποιούνται από τις ιατρικές επιστήμες, τα λέιζερ για τον εντοπισμό των αιωρούμενων σωματιδίων της ατμόσφαιρας, καθώς και το οπτικό σύστημα του ανθρώπινου ματιού.

Τα βασικά στάδια του συστήματος τηλεπισκόπησης περιλαμβάνουν (Παρχαρίδης, 2015):

- ✓ Την εκπομπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ως πηγή θεωρείται συνήθως ο ήλιος),
- ✓ Τη μετάδοση της ενέργειας από την πηγή προς τη γήινη επιφάνεια και την απορρόφηση και σκέδαση από την ανώτερη ατμόσφαιρα,
- ✓ Την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τη γήινη επιφάνεια προς τον απομακρυσμένο αισθητήρα,
- ✓ Τα δεδομένα εξόδου αισθητήρα, καθώς και
- ✓ Τη μετάδοση δεδομένων, την επεξεργασία και την ανάλυση.

Η προηγμένη και σύγχρονη τεχνολογία της τηλεπισκόπησης χρησιμοποιείται για τη λήψη πληροφοριών, που αφορούν ένα στόχο – αντικείμενο ή φαινόμενο – σε μία περιοχή, με τη βοήθεια κατάλληλων μέσων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να αναλύουν τα δεδομένα χάρη στην ύπαρξη εξειδικευμένων λογισμικών και υπολογιστών, υψηλών προδιαγραφών. Ως στόχος μπορεί να θεωρηθεί το φεγγάρι, η Γη ή κάποιος άλλος πλανήτης, ακόμα και τα κύτταρα ενός οργανισμού, που είναι ορατά μόνο με τη χρήση μικροσκοπίου. Τα δεδομένα, επίσης, λαμβάνονται από ειδικές πλατφόρμες, όπως αεροσκάφη, δορυφόρους, πυραύλους, μπαλόνια, διαστημικά λεωφορεία κ.ά., λόγω της ύπαρξης αισθητήρων που περιλαμβάνουν είτε εναέριες φωτογραφικές μηχανές, είτε ραδιόμετρα ή συστήματα ραντάρ για τη συλλογή πληροφοριών.

Ο άνθρωπος από την αρχή της ύπαρξής του ήθελε να καταστήσει δυνατή την ανακάλυψη του μη ορατού και του τι κρύβεται κάτω από την επιφάνεια Γης. Γι' αυτό το λόγο πραγματοποίησε χρονοβόρες και συνεχείς προσπάθειες, προκειμένου να ολοκληρώσει με επιτυχία το στόχο του.

Τα πρώτα βήματα παρατήρησης της Γης στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης έλαβαν χώρα κατά την περίοδο 1946-1950, όταν η Εθνική Υπηρεσία Αεροναυτικής και Διαστήματος (NASA) τοποθέτησε στους πυραύλους V-2, που ρίφθηκαν από τους Γερμανούς κατά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, φωτογραφικές μηχανές 35 χιλιοστών και τους εκτόξευσε από μία περιοχή του Νέου Μεξικού. Η ποιότητα των φωτογραφιών, που λαμβάνονταν, είχαν αρκετά χαμηλή ποιότητα και αφορούσαν στοιχεία από την επιφάνεια της Γης, όπως είναι χαρακτηριστικά το χιόνι, το νερό και ο πάγος (Παρχαρίδης, 2015). Σε μετέπειτα στάδιο, εκτοξεύθηκαν οι πύραυλοι VIKING 11 και 12, οι οποίοι διέθεταν μεγαλύτερες φωτογραφικές μηχανές (K-25) με υπέρυθρο φιλμ και δυνατότητα λήψης από υψόμετρο 225 χιλιομέτρων.



Εικόνα 7: Πύραυλος V-2  
Πηγή: Google

Οι πρώτοι τεχνικοί δορυφόροι Sputnik-1 (εκτοξεύθηκε από την Πρώην Σοβιετική Ένωση το 1957) και Explorer-1 (εκτοξεύθηκε από τις ΗΠΑ το 1958) παρόλο που δεν προσέφεραν καλή ποιότητα φωτογραφιών, ενθάρρυναν τους επιστήμονες να επιτείνουν τις προσπάθειές τους, θέτοντας σε τροχιά νέους δορυφόρους. Οι Cosmos-4, οι Discover και ο TIROS (Television and Infrared Observation Satellite) ήταν



ενδεικτικά κάποιοι από αυτούς. Ο τελευταίος, μάλιστα, που εκτοξεύθηκε από τις Ηνωμένες Πολιτείες το 1960, ήταν και ο πρώτος που διέθετε και τηλεοπτική κάμερα.

Την ίδια χρονιά (1960) ενσωματώθηκαν στους δορυφόρους εξελιγμένοι αισθητήρες, εμφανώς διαφορετικοί από αυτούς που χρησιμοποιούνταν αρχικά και απεικόνιζαν ασπρόμαυρες εικόνες της γήινης επιφάνειας και των νεφών, χαμηλής ανάλυσης και επομένως μικρής λεπτομέρειας. Αργότερα, οι αισθητήρες είχαν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα<sup>8</sup> που εκτεινόταν πέρα από το ορατό φως, το υπέρυθρο τμήμα του. Χάρη σε αυτούς, συλλέγονταν πλέον πληροφορίες σχετικά με τις θερμοκρασιακές μεταβολές, την ταχύτητα των ανέμων, τα σύννεφα κλπ. Έπειτα, σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην τεχνολογία τους, επιτρέποντας τη λήψη φωτογραφιών σε διάφορες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, δημιουργώντας τις λεγόμενες πολυφασματικές εικόνες. Μία τέτοια εικόνα απεστάλη από το διάστημα μέσω της αποστολής Apollo 9 το έτος 1968.

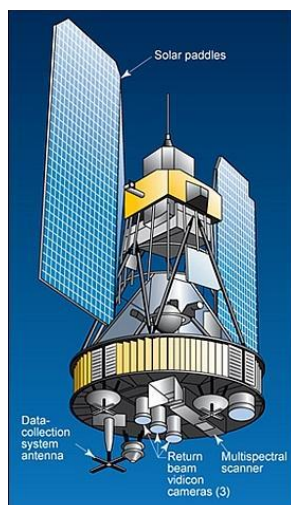
Όλες αυτές οι πειραματικές προσπάθειες έδειξαν ότι η απεικόνιση και παρατήρηση της Γης από το διάστημα είναι δυνατόν να επιτευχθεί, γεγονός που οδήγησε τους επιστήμονες στο σχεδιασμό του προγράμματος Landsat. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε από τη NASA και τη Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (US Geological Survey (USGS)). Ο πρώτος μη επανδρωμένος δορυφόρος λήψης φωτογραφιών της γήινης επιφάνειας, που τέθηκε σε τροχιά ήταν ο επονομαζόμενος ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellites), που εκτοξεύθηκε στις 23 Ιουλίου 1972 και λειτούργησε έως τις 6 Ιανουαρίου 1978. Λίγο καιρό πριν την εκτόξευση του δεύτερου δορυφόρου της ίδιας σειράς (ERTS-2), η NASA τους μετονόμασε σε Landsat (Landsat 1 και Landsat 2 αντίστοιχα). Μέχρι σήμερα έχουν τεθεί σε τροχιά οχτώ δορυφόροι αυτού του προγράμματος.

Οι δορυφόροι Landsat (Land Satellites) διαθέτουν κατάλληλους αισθητήρες, ώστε να παρατηρούν τη Γη από ψηλά, να μεταφέρουν τις διάφορες πληροφορίες, που συλλέγουν με ειδικά σήματα σε επίγειους σταθμούς και να τις επεξεργάζονται, προκειμένου να φτάνουν στους εκάστοτε χρήστες. Οι δορυφόροι πρώτης γενιάς (Landsat 1, 2 και 3) είχαν παρόμοια χαρακτηριστικά στη λειτουργία τους (ύψος τροχιάς 920km, βάρος 815 κιλά, σχήμα πεταλούδας), συμπληρώνοντας μία πλήρη περιφορά γύρω από τη Γη σε 103 λεπτά (συνολικά 14 περιφορές ανά ημέρα). Διέθεταν δύο όργανα παρατήρησης: το σύστημα RBV (Return Beam Videocan) και τον πολυφασματικό σαρωτή MSS (Multi Spectral Scanner) με τέσσερις φασματικές περιοχές (από το ορατό πράσινο έως το μέσο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος). Ο Landsat 3, μάλιστα, διέθετε και μία πέμπτη φασματική περιοχή στο θερμικό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος. Ένα άλλο χαρακτηριστικό τους, επίσης, ήταν πως η ταχύτητα περιστροφής τους γινόταν με την

---

<sup>8</sup> Το εύρος της περιοχής συχνοτήτων, που καλύπτουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

ίδια γωνιακή ταχύτητα με αυτήν της Γης γύρω από τον ήλιο, πράγμα που υποδηλώνει ότι ήταν και ηλιοσύγχρονοι.



**Εικόνα 8: Οι Landsat 1-3**

*Πηγή: Google*

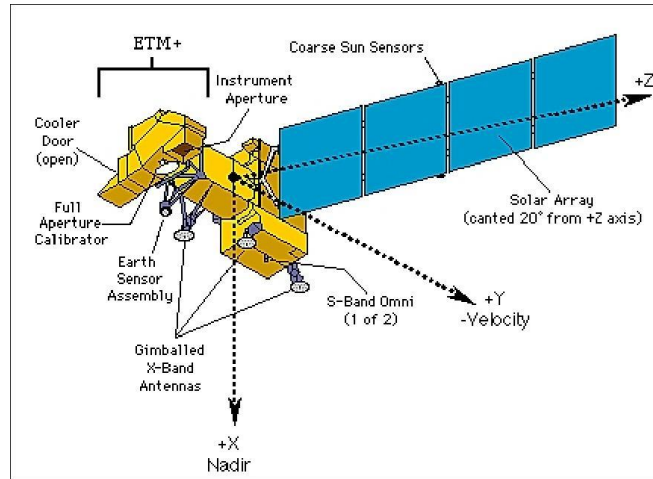
Η επόμενη γενιά δορυφόρων (Landsat 4 και 5) τέθηκε σε μικρότερο ύψος τροχιάς (705 χιλιομέτρων) τα έτη 1982 και 1984, αντίστοιχα, για να καταστεί δυνατή η επιδιόρθωσή τους από τα διαστημικά λεωφορεία σε περίπτωση βλάβης. Ακόμη, διέθεταν τον MSS και το θεματικό χαρτογράφο (Thematic Mapper (TM)), όπου ο τελευταίος περιελάμβανε και άλλες φασματικές περιοχές του μέσου υπερύθρου τμήματος (Short Wave Infrared (SWIR)), καθώς και βελτιωμένη χωρική ανάλυση (120m).



**Εικόνα 9: Οι Landsat 4-5**

*Πηγή: Google*

Οι δορυφόροι Landsat 7 και 8, που βρίσκονται σήμερα σε τροχιά ύψους 705 km, είναι σχεδιασμένοι για να συλλέγουν δεδομένα από ένα εδαφικό πεδίο 185 km. Ο Landsat 7 εμπεριέχει τον Βελτιωμένο Θεματικό Χαρτογράφο (Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)) με χωρική ανάλυση 30m στο ορατό και στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, 60m στο θερμικό και 15m στο παγχρωματικό. Η ταυτόχρονη λήψη του παγχρωματικού και των πολυφασματικών καναλιών προσφέρει μειωμένη προσπάθεια επεξεργασίας των εικόνων που λαμβάνονται.



**Εικόνα 10: Ο Landsat 7**

Πηγή: Google

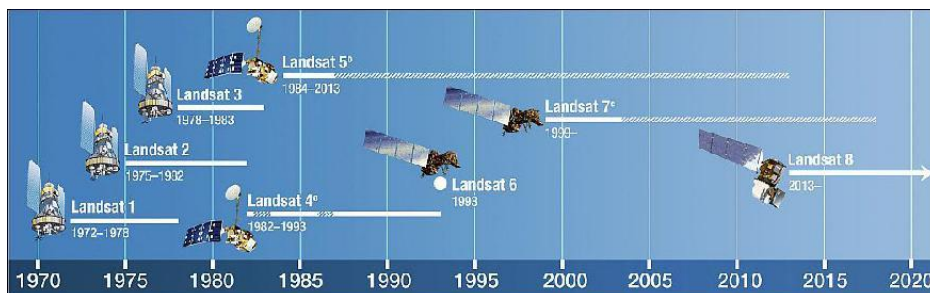
Ο Landsat 8 εκτοξεύθηκε στις 11 Φεβρουαρίου 2013 από το Vandenberg της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ. Ο νέος αυτός δορυφόρος μεταφέρει δύο όργανα καταγραφής: τους αισθητήρες OLI (Operational Land Imager) και TIRS (Thermal Infrared Sensor), που παρέχουν εποχική κάλυψη της παγκόσμιας ξηράς. Ο αισθητήρας OLI συλλέγει δεδομένα σε 8 φασματικές περιοχές με χωρική ανάλυση 30m (ορατό κοντινό υπέρυθρο, μικροκυματικό υπέρυθρο, φασματικές ζώνες ανίχνευσης νεφών και παρατήρησης της παράκτιας ζώνης) και μία παγχρωματική σε 15m (9 δηλαδή φασματικές περιοχές μικρού εύρους), ενώ ο TIRS συγκεντρώνει πληροφορίες σε δύο θερμικές περιοχές χωρικής ανάλυσης 100m.

Ο συγκεκριμένος δορυφόρος κάνει λήψη σε πάνω από 400 εικόνες, τις οποίες στη συνέχεια αποστέλλει στο αρχείο της USGS, περιορίζοντας την εμφάνιση εικόνων με σημαντική νεφοκάλυψη.



**Εικόνα 11: Ο Landsat 8**

Πηγή: Google



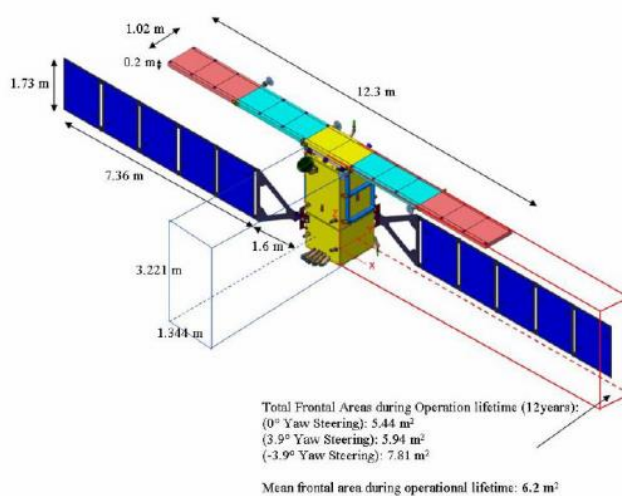
**Εικόνα 12: Οι Landsat δορυφόροι με την πάροδο των χρόνων**

Πηγή: Google

Η παρατήρηση και παρακολούθηση του πλανήτη Γη από το διάστημα συνίσταται σημαντικό και χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη του περιβάλλοντος, για το σχεδιασμό αναπτυξιακών δράσεων, καθώς και για την ενίσχυση των παραγωγικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων (Παρχαρίδης, 2015). Στην Ελλάδα το ισχυρό αυτό εργαλείο εφαρμόζεται σχεδόν μία ολόκληρη τριακονταετία από Πανεπιστημιακά Εργαστήρια, Ερευνητικά Ινστιτούτα και ιδιωτικούς φορείς. Μάλιστα, συνεργάζεται με διεθνείς οργανισμούς, όπως ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός του Διαστήματος (ΕΟΔ (European Space Agency)) και συμμετέχει σε διάφορου είδους προγράμματα, που έχουν σχέση με την τηλεπικοινωνία, την παρατήρηση της Γης κλπ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πρόγραμμα «Παγκόσμια Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος και της Ασφάλειας (Global Monitoring for Environment and Security (GMES))», που αφορά τη διαχείριση των φυσικών πόρων και το μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και είναι πλέον γνωστό με την ονομασία Copernicus.

Το Copernicus είναι ένα από τα πιο φιλόδοξα και σύγχρονα προγράμματα, που έχουν τεθεί σε εφαρμογή μέχρι σήμερα. Εκτός από την παροχή έγκαιρων και εύκολα προσβάσιμων πληροφοριών για τη βελτίωση της διαχείρισης του περιβάλλοντος και την καταπολέμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, εξασφαλίζει στους πολίτες την ασφάλειά τους. Βασικός συντονιστής της διαχείρισης των δεδομένων σε πάνω από 30 δορυφόρους είναι ο ΕΟΔ. Ειδικά για το συγκεκριμένο πρόγραμμα, έχει δημιουργήσει μία νέα σειρά δορυφόρων, οι οποίοι θα προσφέρουν έναν μοναδικό σύνολο παρατηρήσεων με εικόνες ραντάρ καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας (όλο το 24ωρο). Η σειρά αυτή ονομάζεται Sentinel.

Ο πρώτος στη σειρά (Sentinel-1), που τέθηκε σε τροχιά τον Απρίλιο του 2014, διαθέτει ένα προηγμένο όργανο ραντάρ για τη λήψη φωτογραφιών της γήινης επιφάνειας (ημέρα και νύχτα), ανεξαρτήτως καιρού.



**Εικόνα 13: Ο Sentinel-1**  
Πηγή: Google

Η αποστολή Sentinel-2<sup>9</sup>, που εκτοξεύθηκε τον Ιούνιο 2015 και Μάρτιο 2017, μεταφέρει ένα πρωτότυπο όργανο καταγραφής ευρείας κλίμακας και υψηλής χωρικής ανάλυσης πολυφασματικών δεδομένων με 13 φασματικά κανάλια (στο ορατό, υπέρυθρο και μικροκυματικό υπέρυθρο τμήμα του φάσματος) αποτύπωσης του πλανήτη Γη και της βλάστησής του.

Πίνακας 4: Τα 13 φασματικά κανάλια των Sentinel-2 δορυφόρων

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

Πηγή: Satellite Imaging Corporation, 2017

Πρόκειται για μία συστοιχία δύο δίδυμων δορυφόρων (Sentinel-2A και Sentinel-2B), που περιστρέφονται σε αντίθετες πλευρές γύρω από τη Γη με εύρος κάλυψης 290 χιλιόμετρα. Καθένας δορυφόρος μεταφέρει έναν οπτικό πολυφασματικό δέκτη MSI (multispectral instrument), ο οποίος παρέχει οπτικά δεδομένα για αγροτικές και δασικές περιοχές και καθορίζονται δείκτες όπως περιεκτικότητας νερού και χλωροφύλλης, καθώς και πληροφορίες σχετικά με τη ρύπανση λιμνών και παράκτιων υδάτων.

<sup>9</sup> Οι εικόνες του οποίου αξιοποιήθηκαν και στην παρούσα πτυχιακή εργασία.



**Εικόνα 14: Ο Sentinel-2 δορυφόρος**  
*Πηγή: European Space Agency, 2017*

Ο τρίτος στη σειρά δορυφόρος (Sentinel-3) στοχεύει στη μέτρηση της θαλάσσιας στάθμης και της χερσαίας και θαλάσσιας θερμοκρασίας, καθώς και στην πρόβλεψη των ωκεάνιων συστημάτων και την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και του κλίματος. Οι αποστολές Sentinel-4 και Sentinel-5, που δεν έχουν τεθεί ακόμα σε τροχιά, πρόκειται να εστιάσουν στην παρακολούθηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας (ποιότητα του αέρα, παρουσία όζοντος στην στρατόσφαιρα, ηλιακή ακτινοβολία, κλίμα), μεταφέροντας μαζί τους μετεωρολογικούς δορυφόρους, ώστε να προσφέρουν τέτοιου είδους πληροφορίες.

### **3.3. Άλλες τεχνολογίες**

Τα κλιματικά μοντέλα αποτελούν από τα πιο χρήσιμα και βασικά εργαλεία παρακολούθησης του παγκόσμιου κλίματος σε σχέση με παλαιότερες εποχές και εκτίμησης των μεταβολών τις επόμενες δεκαετίες. Χρησιμοποιούν διάφορες αριθμητικές μεθόδους και κάνουν προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων της ατμόσφαιρας με τη γήινη επιφάνεια, τους ωκεανούς, καθώς και τις περιοχές που βρίσκονται κοντά στους πόλους. Τα κλιματικά μοντέλα έχουν ποικίλες δυνατότητες και εφαρμόζονται για διάφορους σκοπούς, με τον πιο σημαντικό να αφορά την εκτίμηση – αξιολόγηση της μεταβολής του κλίματος, παρατηρώντας την πορεία της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας.

Πιο αναλυτικά, βασίζονται στο ενεργειακό ισοζύγιο, υπολογίζοντας την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μικρού κύματος, που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, καθώς και την υπέρυθη (εξερχόμενη) ακτινοβολία, η οποία ανακλάται από τη Γη (Βάσκου, 2015). Αν η διαφορά τους (ως προς την ποσότητα ακτινοβολίας) είναι μεγάλη, τότε σημειώνονται θερμοκρασιακές - κλιματολογικές μεταβολές στον πλανήτη.

Τα κλιματικά μοντέλα κατηγοριοποιούνται σε ομάδες ανάλογα με την πολυπλοκότητα και το σχεδιασμό τους. Τα πιο γνωστά κλιματικά μοντέλα, που περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τη βλάστηση και τον άνθρακα, είναι τα Earth System Models. Άλλες κατηγορίες θεωρούνται τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας

(Global Circulation Models), που έχουν σχεδιαστεί για τη μελέτη της τρισδιάστατης δομής του ανέμου, τα Μοντέλα Ενεργειακού Ισοζυγίου (Energy Balance Models) με ιδιαίτερα απλή δομή και τα Μοντέλα Ενδιάμεσης Πολυπλοκότητας (Earth Models of Intermediate Complexity), τα οποία αναπαριστούν το κλιματικό σύστημα με περισσότερες λεπτομέρειες.

Οι μετεωρολόγοι, καθώς και άλλοι ερευνητές που εξετάζουν τις μεταβολές του κλίματος που συμβαίνουν στον πλανήτη Γη, λαμβάνουν και δεδομένα από παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, γνωστά με την αγγλική ονομασία GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Τα GNSS συστήματα αναφέρονται σ' έναν αστερισμό δορυφόρων, που παρέχουν σήματα από το διάστημα και τα οποία μεταδίδουν δεδομένα εντοπισμού θέσης και χρόνου σε στρατιωτικούς ή πολιτικούς (εμπορικούς και ιδιωτικούς) δέκτες GNSS. Ένα GNSS σύστημα αποτελείται, επίσης, κι από το τμήμα ελέγχου, το οποίο περιλαμβάνει επίγειους σταθμούς ελέγχου δορυφορικού σήματος, καθώς και τη λειτουργική κατάσταση των δορυφόρων.

Βασική αρχή των GNSS συστημάτων είναι ο καθορισμός της θέσης, υπολογίζοντας την απόσταση του σημείου παρατήρησης από έναν δορυφόρο:

$$p = c \cdot t_{\text{διαδρ}},$$

όπου  $p$  η απόσταση δέκτη- δορυφόρου,  $c$  η ταχύτητα του διάδοσης του φωτός στο κενό που είναι ίση με  $3 \cdot 10^8$  m/s και  $t_{\text{διαδρ}}$  ο χρόνος διαδρομής του δορυφορικού σήματος, που απαιτείται για να φτάσει το ραδιοσήμα από τον δορυφόρο στον επίγειο δέκτη.

Η ακριβής θέση του σημείου παρατήρησης στο χώρο προσδιορίζεται από τη μέτρηση τεσσάρων δορυφόρων (το σημείο τομής των σφαιρικών επιφανειών της τροχιάς τους), ώστε να ελεγχθεί με ακρίβεια το ωρολόγιο του δέκτη και να υπολογιστεί το αντίστοιχο πλήθος σφαλμάτων. Τα σφάλματα μπορεί να σχετίζονται με: την περιορισμένη ακρίβεια του ωρολογίου χαλαζία του δέκτη, τον παραγόμενο θόρυβο στο δέκτη, την έλλειψη συγχρονισμού των δορυφορικών ωρολογίων με τον Παγκόσμιο Συντονισμένο Χρόνο UTC (Universal Time Coordinated), τις ιονοσφαιρικές και τροποσφαιρικές επιδράσεις, τις πολλαπλές ανακλάσεις του ραδιοσήματος, την παρεμβολή φυσικών ή τεχνητών εμποδίων (όπως τα κτίρια, οι ορεινοί όγκοι), τη γεωμετρική κατανομή των δορυφόρων και την απόκλισή τους από τις καθορισμένες τροχιές τους.

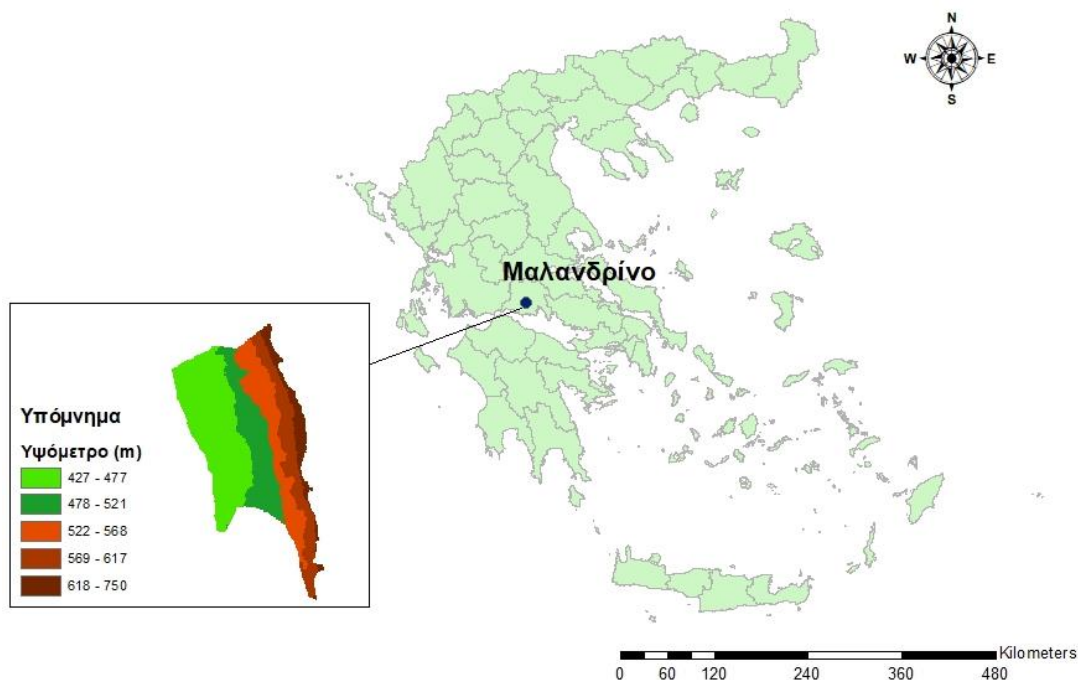
Το ευρωπαϊκό GNSS σύστημα, Galileo, διαδραματίζει σημαντικό και αυξανόμενο ρόλο (άμεσα και έμμεσα) στο μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, χρησιμοποιώντας δορυφορικά σήματα και δεδομένα για την καλύτερη κατανόησή τους μέσω της ακριβούς παρατήρησης και μέτρησης (πχ. της κατάστασης των ωκεανών ή της χημικής σύνθεσης της ατμόσφαιρας). Η ΕΕ έχει θεσπίσει

ενεργειακές πολιτικές με μελλοντικές στρατηγικές για την αλλαγή του κλίματος, αναζητώντας όλο και περισσότερες απαντήσεις σε θέματα που σχετίζονται με το φαινόμενο αυτό. Το Galileo παρέχει καινοτόμες λύσεις σε πολλές από τις σημερινές προκλήσεις που αφορούν τη μεταβολή του κλίματος, όπως είναι η παρακολούθηση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, η διευκόλυνση της γεωργίας ακριβείας, η παροχή χαρτών για την εξεύρεση καλύτερων θέσεων για υποδομές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κλπ.

## 4. Εμπειρική ανάλυση

### 4.1. Δεδομένα – Περιοχή μελέτης

Για την ανάπτυξη κατάλληλου μοντέλου, που υπολογίζει και εκτιμά την επάρκεια σε ποσότητα οργανικής ουσίας, επιλέχθηκε ως πιλοτική περιοχή το Μαλανδρίνο Φωκίδας.



Χάρτης 5: Η περιοχή μελέτης

Το Μαλανδρίνο είναι χωριό του νομού Φωκίδας, το οποίο ανήκει στο Δήμο Δωρίδας της Περιφερειακής Ενότητας Φωκίδας της Στερεάς Ελλάδας. Σύμφωνα με το πρόγραμμα «Καλλικράτης», υπάγεται στην Τοπική Ενότητα Λιδωρικού.

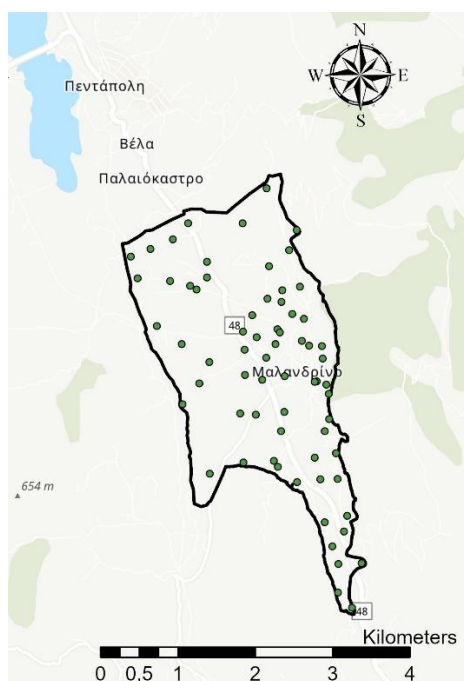
Η περιοχή βρίσκεται στους πρόποδες της νοτιοδυτικής οροσειράς της Γκιώνας σε υψόμετρο 580 μέτρων. Έχει εκτεταμένη περιφέρεια με κτήματα. Στο παρελθόν οι κάτοικοι ασχολούνταν με την παραγωγή δημητριακών (κυρίως το σιτάρι) και αμυγδάλων, καθώς με την καλλιέργεια αμπελώνων. Μερικοί αμπελώνες διατηρούνται και σήμερα παράγοντας καλό κρασί με παραδοσιακό τρόπο. Ο συνδυασμός πεδινής και ορεινής έκτασης ευνοεί την ανάπτυξη και της κτηνοτροφίας.



Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως ηπειρωτικό. Ο χειμώνας είναι πολύ ψυχρός, με πολλά χιόνια στα ορεινά και το καλοκαίρι αρκετά θερμό, εξαιτίας της απουσίας της θάλασσας. Το θερμοκρασιακό εύρος κυμαίνεται από 9°C έως 27°C, με τη μέση ετήσια θερμοκρασία να αγγίζει τους 18 °C. Η σχετική υγρασία του αέρα ανέρχεται στο 66%, ενώ η μέση τιμή βροχόπτωσης είναι τα 57mm.

Η κατανομή των βροχοπτώσεων δεν είναι ομοιόμορφη κατά τη διάρκεια του έτους. Πιο συγκεκριμένα, το 45% των βροχών πέφτει κατά τη διάρκεια του χειμώνα, το 32% κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, το 20% κατά τη διάρκεια της άνοιξης και μόλις το 3% την καλοκαιρινή περίοδο.

Στη συγκεκριμένη περιοχή είχε πραγματοποιηθεί το 2018 εδαφολογική μελέτη, όπου εξετάστηκαν οι εδαφικές παράμετροι σε 68 θέσεις δειγματοληψίας.



**Χάρτης 6: Σημεία απ' όπου λήφθηκαν δείγματα του εδάφους**

Η παρούσα πτυχιακή βασίστηκε στα δεδομένα αυτής της εδαφολογικής μελέτης (αρχείο ΕΛΓΟ Δήμητρα). Επίσης, σημαντικό ρόλο έπαιξαν και διάφοροι δείκτες, που προέκυψαν από τις τιμές των φασματικών καναλιών δορυφορικών εικόνων (Sentinel-2) του αντίστοιχου έτους. Πιο συγκεκριμένα, οι 6 μεταβλητές που αξιοποιήθηκαν ήταν οι εξής: η άργιλος, το pH, τα άλατα, ο δείκτης βλάστησης (NDVI), ο δείκτης γυμνού εδάφους (BSI) και ο δείκτης χρωματισμού εδάφους (SCI).

Το έδαφος αποτελείται από στερεά υλικά (ανόργανα και οργανικά), αέρα και νερό. Τα στερεά ανόργανα υλικά ποικίλλουν ως προς το μέγεθος κι έτσι συναντώνται κροκάλες και χάλικες, που έχουν αρκετά μεγάλο μέγεθος, καθώς και κόκκοι, που σε ορισμένες περιπτώσεις δύσκολα διακρίνονται με γυμνό μάτι κι η χρήση

μικροσκοπίου κρίνεται απαραίτητη. Προκειμένου να διευκολυνθούν οι επιστήμονες στην έρευνά τους, ταξινόμησαν τους εδαφικούς σχηματισμούς ανάλογα με το μέγεθός τους σε χονδρόκοκκα (χάλικες, άμμος) και λεπτόκοκκα (ιλύς, άργιλος) υλικά. Ειδικότερα, η κατηγοριοποίησή τους έγινε με βάση τον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 5: Ταξινόμηση με βάση το μέγεθος των κόκκων σε χιλιοστά**

Άργιλοι	Ιλεις			Άμμοι			Χάλικες			Κροκάλες					
	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές						
0.001	0.002	0.006	0.02	0.06	0.1	0.2	0.6	1	2	6	10	20	60	100	200

Διαστάσεις κόκκων (mm)

Πηγή: Google

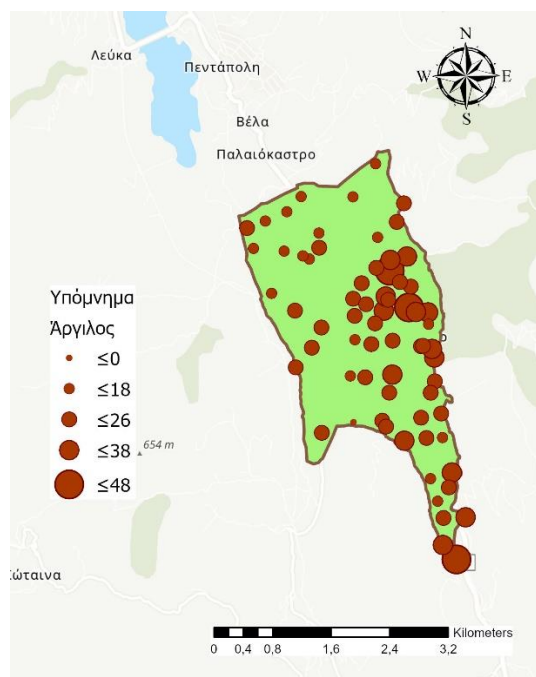
Σύμφωνα με τον Πίνακα 5, εδάφη με κόκκους από 2mm – 60mm ανήκουν στην κατηγορία των χαλικών, ενώ αν ξεπεράσουν το όριο των 60mm τα ιζήματα που σχηματίζονται ονομάζονται κροκάλες. Κόκκοι με διαστάσεις από 0,06mm έως 2mm είναι άμμος. Στις τελευταίες κατηγορίες λεπτόκοκκων υλικών ανήκουν οι κόκκοι ιλύος (0,002mm έως 0,06mm) και αργίλου (μέγεθος μικρότερο από 0,002mm). Οι κόκκοι αυτοί δε διακρίνονται πλέον με γυμνό μάτι, αλλά εντοπίζονται μέσω του μικροσκοπίου μέσα από εργαστηριακές αναλύσεις.

Η άργιλος προέρχεται από την αποσάθρωση των πετρωμάτων, κυρίως των πυριτιούχων, εξαιτίας της παρουσίας  $\text{CaCO}_3$ , της κίνησης του νερού και του αέρα στην ατμόσφαιρα, της διέλευσης ενός ποταμού ή των μικρότερης κλίμακας γεωλογικών αιτιών που προξενούν πιέσεις και απότομες αυξομειώσεις της θερμοκρασίας στα πετρώματα. Εντοπίζεται είτε στην επιφάνεια του εδάφους, είτε στο υπέδαφος με τη μορφή κοιτασμάτων, που διαφέρουν ως προς την ποιότητα, την καθαρότητα, τη σύνθεση και το χρώμα.

Η άργιλος συνυπάρχει μαζί και με άλλα υλικά, όπως άμμος, χάλικες, ασβέστιο, ακόμα και οργανικά υλικά. Τα οργανικά υλικά πηγάζουν από φυτά, τα οποία βρίσκονταν ανάμεσα στα στρώματα των κοιτασμάτων σαν ιζήματα παρασυρμένα από επιφανειακά νερά. Στη συνέχεια, αποσυντίθενται ανάμεσα στην αργιλώδη μάζα και κατακάθονται. Μάλιστα, σε ευσταθή εδάφη είναι πιθανόν να βρεθούν και κομμάτια φυτών (πχ. ολόκληρες ρίζες). Οι οργανικές ουσίες μέσα στον πηλό συνήθως τροποποιούν το χρώμα του κοιτάσματος και το κάνουν να φαίνεται πιο σκούρο, γκρίζο, μολυβί, μπλε κτλ., λόγω του άνθρακα που περιέχουν.

Τα αργιλώδη εδάφη έχουν τη δυνατότητα να συγκρατούν μεγάλη ποσότητα υγρασίας και θρεπτικών στοιχείων κι έτσι είναι αρκετά δύσκολο να εφαρμοστούν καλλιεργητικές πρακτικές. Πολλές φορές παρουσιάζουν προβλήματα στράγγισης, ενώ η ανάπτυξη της ρίζας μέσα στο έδαφος δεν πραγματοποιείται με τον πιο εύκολο τρόπο, υποβαθμίζοντας την ποιότητά του και δυσχεραίνοντας την ανάπτυξη των φυτών. Οι μόνες καλλιέργειες που είναι ικανές να αναπτυχθούν κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι το σιτάρι, η βρώμη, τα ψυχανθή και η κράμβη.

Για να διερευνηθεί η χωρική κατανομή των τιμών της μεταβλητής «άργιλος» κατασκευάστηκε θεματικός χάρτης, ο οποίος απεικονίζει τη διασπορά των σημείων στην υπό μελέτη περιοχή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση προτιμήθηκε η χρήση συμβόλων σε αποχρώσεις του εδάφους, αφού πρόκειται για στοιχεία που βρίσκονται μέσα σε αυτό, στα σημεία όπου έγινε η δειγματοληψία τους. Το μέγεθος του συμβόλου υποδηλώνει και την ανάλογη ποσότητα που εντοπίστηκε εκεί.



**Χάρτης 7: Χωρική κατανομή της αργίλου στην περιοχή**

Έτσι, λοιπόν, με βάση τον παραπάνω χάρτη και σύμφωνα με το πρόγραμμα χαρτογράφησης ArcGIS Pro<sup>10</sup> είναι εμφανές ότι η άργιλος κατέχει κυρίαρχο ρόλο στην περιοχή, καθώς σημαντικές ποσότητες της (26-48%) εντοπίζονται στο κεντρικό και νότιο τμήμα της περιοχής. Ακόμη, μικρά ποσοστά βρέθηκαν πλησίον της τεχνητής λίμνης του Μόρνου (18%), ενώ όσο η απόσταση αυξανόταν τόσο το ποσοστό της γινόταν όλο και μεγαλύτερο (έως και 48%).

Η χωρική παρεμβολή αποτελεί μια διαδικασία εκτίμησης της τιμής ενός χαρακτηριστικού σε σημεία που δεν ανήκουν στο δείγμα, με βάση τις μετρήσεις στα σημεία δειγματοληψίας. Υπάρχουν ποικίλες μέθοδοι παρεμβολής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εξειδικευμένα λογισμικά. Οι σημαντικότερες από αυτές τις μεθόδους ανήκουν σε τρεις κατηγορίες μεθόδων παρεμβολής: τις μεθόδους τοπικών

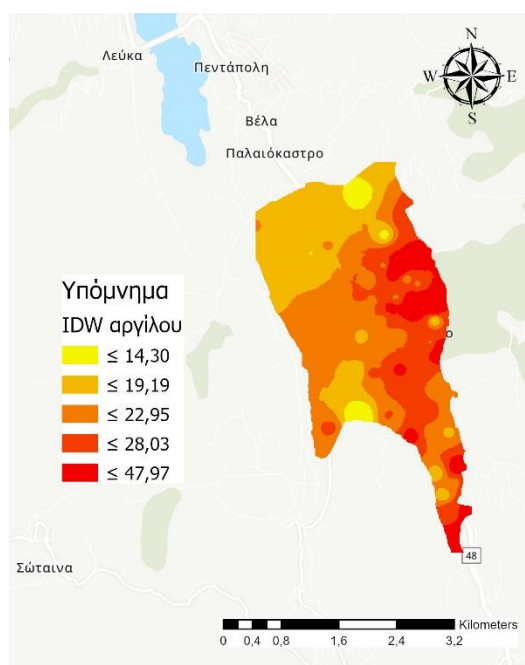
<sup>10</sup> Πρόκειται για ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών, το οποίο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία, επεξεργασία και χρήση χαρτών, τη σύνταξη γεωγραφικών δεδομένων, την ανάλυση χαρτογραφημένων πληροφοριών, καθώς την κοινή χρήση και ανακάλυψη γεωγραφικών δεδομένων μέσα από μία σειρά εφαρμογών και διαχείρισης πληροφοριών σε μία βάση δεδομένων.

εκτιμήσεων, τις γεωστατικές μεθόδους (kriging) και τις μεθόδους γενικευμένων προσεγγίσεων.

Οι μέθοδοι τοπικής εκτίμησης βασίζονται στην υπόθεση ότι κάθε διακριτό σημείο επηρεάζει τις τιμές των γειτονικών του σημείων, μέχρι μια ορισμένη απόσταση μεταξύ τους. Οι τιμές των σημείων με απουσία δειγματοληπτικών δεδομένων υπολογίζονται από συναρτήσεις με διαφορετικές παραμέτρους και η διασύνδεση μεταξύ αυτών των συναρτήσεων προσδιορίζεται μόνο με κάποιες προσεγγίσεις (Νικολακόπουλος, 2015).

Οι συνηθέστερες μέθοδοι παρεμβολής τοπικής γεινιάσης είναι η σταθμισμένη παρεμβολή αντίστροφης απόστασης (inverse distance weighted interpolation (IDW)), η παρεμβολή φυσικής γεινιάσης (natural neighborhood interpolation) και η παρεμβολή ακανόνιστου τριγωνικού δικτύου (TIN interpolation).

Η σταθμισμένη παρεμβολή αντίστροφης απόστασης (IDW), που επιλέχθηκε για την απεικόνιση παραμέτρων του μοντέλου, βασίζεται στον πρώτο νόμο της γεωγραφίας, σύμφωνα με τον οποίο: τα πράγματα που είναι κοντά το ένα με το άλλο είναι περισσότερο όμοια από τα απομακρυσμένα. Για να προβλέψει μια τιμή σε μία τοποθεσία (μη μετρήσιμη), η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τις ήδη υπάρχουσες τιμές από σημεία που περιβάλλουν τη θέση πρόβλεψης. Οι μετρημένες τιμές που βρίσκονται πλησιέστερα στην τοποθεσία πρόβλεψης έχουν μεγαλύτερη επίδραση στην προβλεπόμενη τιμή από αυτές που βρίσκονται πιο μακριά (ESRI, 2020).

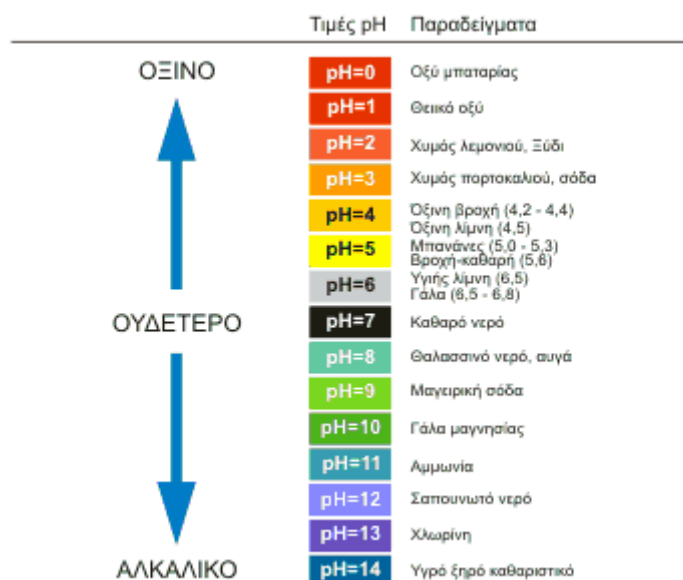


Χάρτης 8: Χωρική παρεμβολή αργίλου

Στον παραπάνω χάρτη αποτυπώνεται η μέθοδος χωρικής παρεμβολής IDW. Η κατανομή της μηχανικής σύστασης ορίζεται κάθετα ως προς τη διεύθυνση της

τεχνητής λίμνης με τις μεγαλύτερες τιμές αργίλου να εμφανίζονται μακριά από τις όχθες. Ωστόσο, παρουσιάζονται και μερικές αποκλίσεις ως προς την ποσότητα σε ορισμένα σημεία της περιοχής που μελετάται.

Το pH του εδάφους είναι μια μονάδα μέτρησης της οξύτητας ή της αλκαλικότητας του εδάφους και θεωρείται μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους, που θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, για την καλλιέργεια των φυτών. Πολλοί φυτικοί και ζωντανοί οργανισμοί, που ζουν στο έδαφος, έχουν προτίμηση είτε στο αλκαλικό, είτε στο όξινο. Γνωρίζοντας την τιμή του pH μίας καλλιεργήσιμης έκτασης είναι δυνατόν να επιλεγούν τα κατάλληλα είδη φυτών, που πρόκειται να έχουν περισσότερες πιθανότητες να ευδοκιμήσουν σε αυτήν. Κάθε φυτό χρειάζεται συγκεκριμένο pH για να καταφέρει να αναπτυχθεί, εφόσον βρίσκει τις ιδανικές ποσότητες θρεπτικών συστατικών του. Οι τιμές του κυμαίνονται 0-14, με το 7 να υποδηλώνει ουδέτερο έδαφος, ενώ όταν είναι κάτω από αυτό το όριο, το έδαφος ονομάζεται όξινο και πάνω από αυτό βασικό. Το pH επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες. Ειδικότερα, σε περιοχές με υψηλές βροχοπτώσεις το έδαφος είναι όξινο, ενώ σε περιοχές που η απουσία της βροχής είναι αισθητή επικρατεί ξηρασία είναι αλκαλικό. Η χρήση λιπασμάτων μπορεί, επίσης, να επηρεάσει το pH στο χώμα.

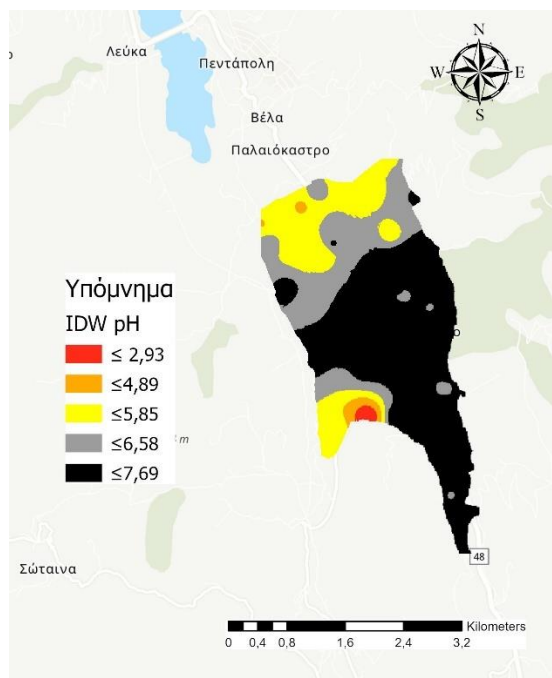


Διάγραμμα 4: Η κατανομή των τιμών που μπορεί να λάβει το pH

Πηγή: kalliergo.gr, 2010

Η πλειοψηφία των φυτών προτιμά ουδέτερο έδαφος με το pH να ισούται με 7 ή ελαφρώς όξινο (pH<7). Πιο συγκεκριμένα, στα πολύ όξινα εδάφη (pH=5,4) αναπτύσσονται διάφορα φρούτα και λαχανικά, όπως είναι οι μελιτζάνες, τα αντίδια, οι πατάτες, οι γλυκοπατάτες, οι φράουλες, τα καρπούζια και τα μύρτιλα. Σε μέτρια όξινα εδάφη (5,5 ≤ pH ≤ 5,9) ευδοκιμούν οι μηλιές, οι φασολιές, τα καλαμπόκια, οι πιπεριές, οι κολοκυθιές, ο βασιλικός κι ο μαϊντανός, ενώ στα ελαφρώς όξινα (6 ≤ pH

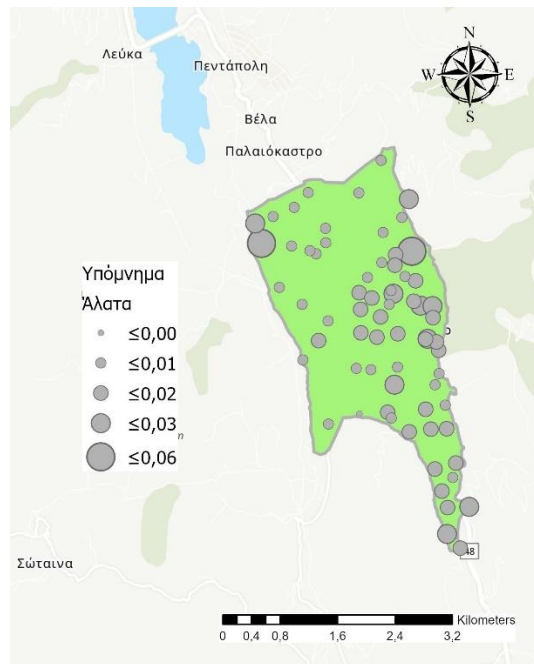
≤ 6,9) οι αγκινάρες, τα μπρόκολα, τα σταφύλια, οι μπάμιες, τα μαρούλια, τα κρεμμύδια, τα ροδάκινα κι ο άνηθος. Τέλος, στα αλκαλικά εδάφη (pH>7) καλλιεργούνται φυτά, όπως το αγγούρι, το πεπόνι, το κουνουπίδι, το σέλινο και το θυμάρι.



Χάρτης 9: Χωρική παρεμβολή pH

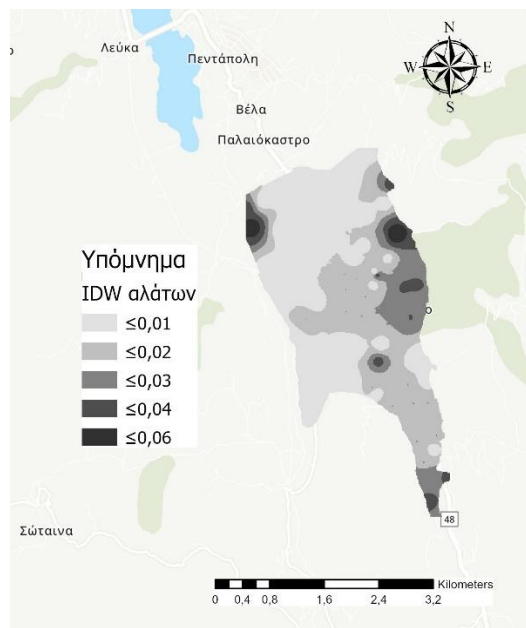
Σύμφωνα με τον Χάρτη 9, η πλειοψηφία των τιμών του pH αφορά κυρίως ουδέτερα εδάφη (pH=7). Το βόρειο και νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής κατακλύζεται από εδάφη όξινα, με pH έως και 3.

Η τρίτη παράμετρος που θα μας απασχολήσει, η αλάτωση του εδάφους, εμφανίζεται εκεί που το μητρικό υλικό είναι πλούσιο σε διαλυτά άλατα ή εκεί που υπάρχει ρηχός αλατούχος υπόγειος υδροφορέας. Ακόμη, σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές οι συγκεντρώσεις αλάτων αυξάνονται, καθώς οι βροχοπτώσεις δεν επαρκούν και η στράγγιση είναι περιορισμένη. Γεωχημικές διαδικασίες, επίσης, συμβάλλουν στο σχηματισμό αλατούχων εδαφών. Στις αρδευόμενες εκτάσεις που δεν υπάρχει επαρκής αποστράγγιση των εδαφών, τα εδάφη γίνονται αλατούχα και μη παραγωγικά, μειώνοντας όχι μόνο τη διαθεσιμότητα του νερού στις καλλιέργειες, αλλά και τη διαθεσιμότητα των μικροθρεπτικών συστατικών σε αυτές.



**Χάρτης 10: Χωρική κατανομή των αλάτων στην περιοχή**

Με βάση τον παραπάνω χάρτη είναι εμφανές ότι τα άλατα είναι σχεδόν ανύπαρκτα στην περιοχή, χωρίς κάποια συγκεκριμένη κατανομή σε σχέση με τη λίμνη. Το ίδιο παρατηρείται και με τη χωρική παρεμβολή (Χάρτης 11), με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση αλάτων που καταγράφεται να είναι 0,06 dS/m.



**Χάρτης 11: Χωρική παρεμβολή αλάτων**

Η αλατότητα επηρεάζει την απόδοση των φυτών. Σε αυτά, το νερό διαπερνά το ριζικό σύστημά τους μέσω της διαδικασίας της όσμωσης<sup>11</sup>. Όταν οι συγκεντρώσεις

<sup>11</sup> Η κίνηση του νερού από εδάφη με χαμηλή συγκέντρωση αλάτων προς άλλα με υψηλή συγκέντρωση αλάτων (εσωτερικό κυττάρων ριζών).

των αλάτων στο έδαφος είναι υψηλές, η κίνηση του νερού προς το ριζικό σύστημα μειώνεται αισθητά και τα φυτά μαραίνονται. Πέρα από αυτήν τη διαδικασία, υπάρχει και η τοξική δράση του νατρίου - χλωρίου στα φυτά. Οπωροφόρα δένδρα και καλλωπιστικά φυτά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε υψηλές συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών. Η ευαισθησία των φυτών στα άλατα ποικίλει αρκετά.

Πίνακας 6: Παραδείγματα ανθεκτικότητας φυτών στην αλατότητα

ευαίσθητες (0-4 dS/m)	μέτρια ανθεκτικές (4-6 dS/m)	ανθεκτικές (6-8 dS/m)	πολύ ανθεκτικές (8-12 dS/m)
αμυγδαλιά	καλαμπόκι	συκιά	κριθάρι
φασολιά	σόργο	βρώμη	βαμβάκι
τριφύλλι	μαρούλι	ροδιά	ελιά
κρεμμύδι	σόγια	ηλίανθος	ρύζι
πατάτα	ντομάτα	σιτάρι	αγρόπυρο

Πηγή: Brady, 2002

Ο δείκτης βλάστησης (NDVI) είναι ένας κανονικοποιημένος δείκτης, ο οποίος υπολογίζει τη ζωτικότητα της βλάστησης με βάση δορυφορικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, βασίζεται στην αρχή ότι η χλωροφύλλη (χρωστική του φυλλώματος των φυτών) δεσμεύει το ορατό φως<sup>12</sup> (μήκος κύματος από 0,4 έως 0,7 μm) σε υψηλά ποσοστά, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί στη διαδικασία της φωτοσύνθεσης για τη μετατροπή του CO<sub>2</sub> και του νερού σε οξυγόνο και σε ενεργειακά πλούσιες οργανικές ενώσεις (κυρίως υδατάνθρακες). Στη συνέχεια, η κυτταρική δομή του φυλλώματος ανακλά το υπέρυθρο φως (μήκος κύματος από 0,7 έως 1,1 μm) σε μεγάλο βαθμό. Σε περίπτωση που η ανακλώμενη ακτινοβολία στο υπέρυθρο μήκος κύματος ξεπερνά (σε ποσότητα) το μήκος κύματος του ορατού φωτός, τότε η βλάστηση θα εμφανίζεται πυκνή στο συγκεκριμένο εικονοστοιχείο (pixel), γεγονός που θα υποδηλώνει κάποιο είδος δάσους.

Ο μαθηματικός τύπος του δείκτη βλάστησης διατυπώνεται ως εξής:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

όπου το NIR είναι η υπέρυθη ακτινοβολία (κανάλι 8 του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της δορυφορικής εικόνας), ενώ το Red είναι η ορατή ακτινοβολία του κόκκινου χρώματος (κανάλι 4 του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της δορυφορικής εικόνας).

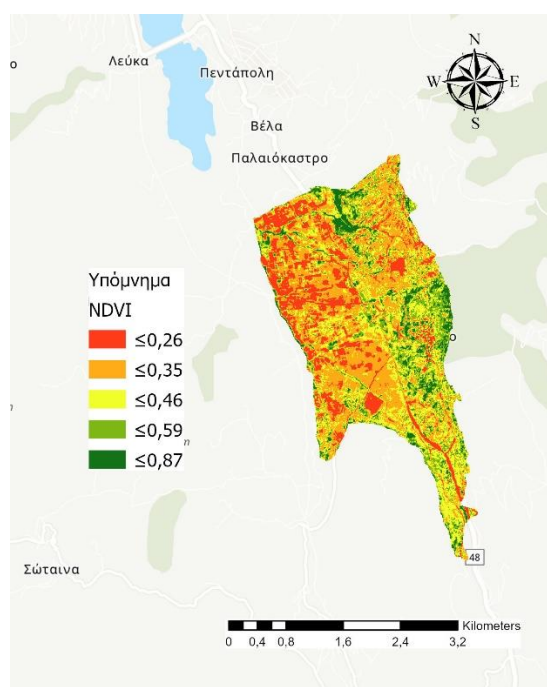
Οι τιμές, που μπορεί να πάρει ο δείκτης βλάστησης (NDVI), κυμαίνονται από -1 έως 1. Σε περίπτωση που πάρει αρνητική τιμή σημαίνει πως από τη μία είναι εμφανής η απουσία της βλάστησης, από την άλλη γίνεται αισθητή η παρουσία χιονιού, νερού ή σύννεφων, ενώ η θετική τιμή υποδηλώνει την παρουσία βλάστησης

<sup>12</sup> Το τμήμα εκείνο του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που είναι ορατό στο ανθρώπινο μάτι. Εκπέμπεται είτε από πυγολαμπίδες και λαμπτήρες, είτε από ταχέως κινούμενα σωματίδια, τα οποία συγκρούονται με άλλα σωματίδια.



ή των ανακλώμενων επιφανειών. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του NDVI, τόσο πιο πράσινο θα είναι το χρώμα στο εικονοστοιχείο (φυτική κάλυψη).

Στην περιοχή του Μαλανδρίνο, ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (NDVI) παίρνει τιμές από 0,26 έως 0,87, με τις χαμηλότερες τιμές να κάνουν πιο αισθητή την εμφάνισή τους ιδιαίτερα στο δυτικό και βόρειο τμήμα. Η φυτική κάλυψη φαίνεται να είναι πλουσιότερη κεντρικά και ανατολικά, καθώς και βόρεια σε ορισμένα σημεία της υπό εξέταση περιοχής.



Χάρτης 12: Δείκτης NDVI της περιοχής του Μαλανδρίνο

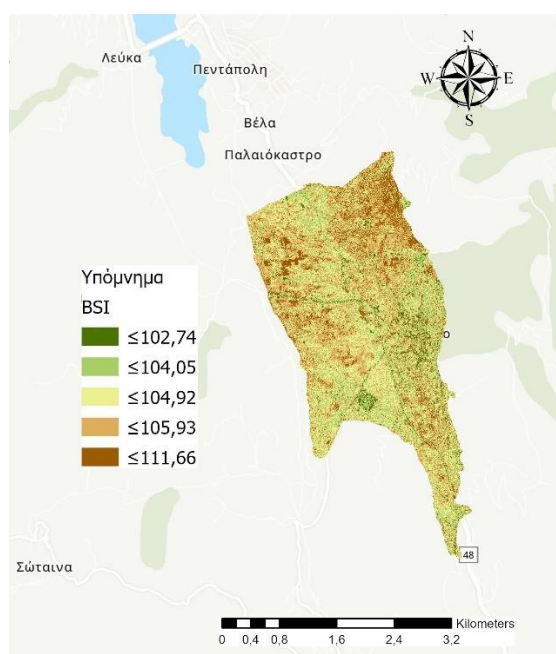
Το γυμνό έδαφος αναφέρεται στο έδαφος εκείνο που δεν καλύπτεται από γρασίδι, χαλίκια, τεχνητό χλοοτάπητα ή κάποιου άλλου είδους υλικό. Ο δείκτης γυμνού εδάφους (BSI) είναι ένας αριθμητικός δείκτης που συνδυάζει το μπλε, κόκκινο, πράσινο και υπέρυθρο κανάλι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, προκειμένου να εντοπίσει τις αλλαγές που πραγματοποιούνται στο έδαφος (Bhunia κ.ά., 2017). Ο δείκτης ευθύνεται ιδιαίτερα για τις μεταβολές της γωνίας του ήλιου (Shabou κ.ά., 2015). Οι τιμές του BSI σχεδιάστηκαν για να ελαχιστοποιήσουν τις εντοπισμένες αιτίες, ομαλοποιώντας την ηλιοφάνεια και τις σκιασμένες διαφορές εδάφους, ελαχιστοποιώντας τις συνθήκες ξηρότητας και υγρασίας (Kumar κ.ά., 2016).

Σύμφωνα με τους Jamalabad και Abkar (2004), ο BSI υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση, χρησιμοποιώντας ως βοηθητικό εργαλείο δορυφορικές εικόνες του Sentinel-2:

$$BSI = \frac{[(Red+Green)-(Red+Blue)]}{[(NIR+Green)+(Red+Blue)]} \times 100 + 100,$$

όπου το NIR είναι η υπέρυθη ακτινοβολία (κανάλι 8 του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της δορυφορικής εικόνας), το RED είναι η ορατή ακτινοβολία του κόκκινου χρώματος (κανάλι 4 του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της δορυφορικής εικόνας), το Blue η ορατή ακτινοβολία του μπλε χρώματος (κανάλι 2 του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της δορυφορικής εικόνας), ενώ το Green η ορατή ακτινοβολία του πράσινου χρώματος (κανάλι 3 του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της δορυφορικής εικόνας). Όσο υψηλότερη είναι η τιμή του BSI, τόσο πιο απογυμνωμένο είναι το έδαφος κι επομένως η φυτική κάλυψη απουσιάζει.

Στην περιοχή του Μαλανδρίνο, ο δείκτης γυμνού εδάφους (BSI) παίρνει τιμές από 102,74 έως 111,66 , με τις χαμηλότερες τιμές να κάνουν πιο αισθητή την εμφάνισή τους ιδιαίτερα στο κεντρικό και νότιο τμήμα. Η φυτική κάλυψη φαίνεται να απουσιάζει και το έδαφος να «απογυμνώνεται» ΒΑ της υπό εξέταση περιοχής.



**Χάρτης 13: Δείκτης BSI της περιοχής του Μαλανδρίνο**

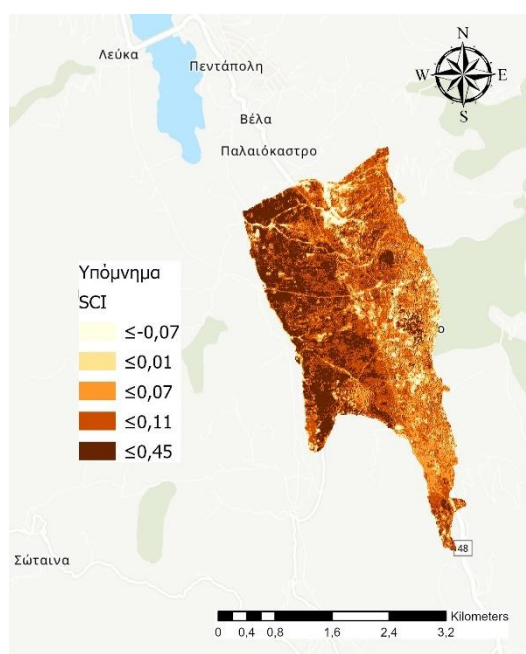
Ο δείκτης χρωματισμού εδάφους (SCI) αναπτύχθηκε για να διαφοροποιήσει τα εδάφη στην περιοχή που μελετάται και υπολογίζεται από τον συνδυασμό κόκκινου και πράσινου καναλιού του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Συνήθως, χρησιμοποιείται για διαχρονική ανάλυση, γεγονός που βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της εξέλιξης της επιφάνειας του εδάφους.

Ο μαθηματικός τύπος του δείκτη χρωματισμού εδάφους διατυπώνεται ως εξής:

$$SCI = \frac{(Red - Green)}{(Red + Green)},$$

όπου το Red είναι η ορατή ακτινοβολία του κόκκινου χρώματος (κανάλι 4 του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της δορυφορικής εικόνας), ενώ το Green είναι η ορατή ακτινοβολία του πράσινου χρώματος (κανάλι 3 του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της δορυφορικής εικόνας). Η διαφοροποίηση στην απόχρωση του εδάφους, υποδηλώνει άλλο τύπο φυτικής κάλυψης.

Στην περιοχή του Μαλανδρίνο, ο δείκτης χρωματισμού εδάφους (SCI) παίρνει τιμές από -0,07 έως 0,45, με τις χαμηλότερες τιμές να εμφανίζονται κυρίως στο κεντρικό και βόρειο τμήμα. Επίσης, η φυτική κάλυψη φαίνεται να διαφοροποιείται ανατολικά και δυτικά της περιοχής.



Χάρτης 14: Δείκτης SCI της περιοχής του Μαλανδρίνο

## 4.2. Μεθοδολογία

### 4.2.1. Επανασύσταση δορυφορικής εικόνας (resampling)

Η γεωμετρική διόρθωση αποσκοπεί στη βελτίωση της αναπαράστασης της εικόνας στη γήινη επιφάνεια. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί κατά τη διάρκεια της καταγραφής οι τοπογραφικές συνθήκες και η γεωμετρική παραμόρφωση μπορεί να διαταράξουν την εικόνα (Wang κ.ά., 2013). Οι πηγές των γεωμετρικών παραμορφώσεων ποικίλουν από τη μεταβολή του ύψους, τον προσανατολισμό των αξόνων, μέχρι την ταχύτητα της πλατφόρμας μεταφοράς του δέκτη. Η καμπυλότητα της Γης, η ατμοσφαιρική διάθλαση, η μετατόπιση λόγω ανάγλυφου και η μη γραμμικότητα στην περιστροφή του στιγμιαίου οπτικού πεδίου του δέκτη είναι μερικές από τις παραμέτρους που εξαρτώνται οι γεωμετρικές αυτές παραμορφώσεις. Η γεωμετρική διόρθωση έχει σκοπό να αποκαταστήσει μέρος των παραμορφώσεων,

που προκύπτουν από τις παραπάνω παραμέτρους, έτσι ώστε οι διορθωμένες εικόνες να έχουν γεωμετρική απεικόνιση ενός χάρτη.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν όλα τα φασματικά κανάλια των πολυφασματικών εικόνων. Γι' αυτό το λόγο, κρίθηκε απαραίτητο να γίνει επανασύσταση (resampling) της χωρικής διακριτικής ικανότητας των καναλιών, με τέτοιο τρόπο ώστε όλα τα κανάλια να έχουν το ίδιο μέγεθος εικονοστοιχείων (pixel). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι πολυφασματικές εικόνες των καναλιών με ανάλυση 20 μέτρα θα μετατραπούν σε μέγεθος pixel 10 μέτρα.

Οι εικόνες Sentinel-2 καταλαμβάνουν μία περιοχή 100km x 100km. Επειδή δε χρησιμοποιείται όλη αυτή η επιφάνεια, επιλέγεται ένα πολύγωνο που περιλαμβάνει την περιοχή μελέτης, προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος των εικόνων και ο υπολογιστικός όγκος. Όλες οι παραπάνω διαδικασίες εκτελέστηκαν στο λογισμικό SNAP<sup>13</sup>.

#### 4.2.2. Στατιστική ανάλυση δεδομένων

Ανάλογα με την κλίμακα μέτρησης των δεδομένων υπάρχουν περισσότερα του ενός μέτρα, που εκφράζουν το μέσο όρο και ονομάζονται μέτρα κεντρικής τάσης ή θέσης. Τα μέτρα αυτά περιλαμβάνουν τις τιμές όλων των δεδομένων, έτσι ώστε να τις αποδώσουν με μία μόνο τιμή και χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν κυρίως ποσοτικά δεδομένα (Ηλιοπούλου, 2015). Τέτοια είναι ο αριθμητικός μέσος (arithmetic mean), η διάμεσος (median) και η επικρατούσα τιμή (mode).

Πιο αναλυτικά, ο αριθμητικός μέσος ορίζεται ως το πηλίκο του αθροίσματος όλων των παρατηρήσεων προς το πλήθος τους, ενώ η επικρατούσα τιμή ως η τιμή που εμφανίζεται με τη μεγαλύτερη συχνότητα, δηλαδή αυτή που συναντάται πιο πολλές φορές στα δεδομένα. Με τη βοήθεια του στατιστικού προγράμματος SPSS<sup>14</sup>, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μεταβλητές άργιλος, pH, άλατα, NDVI, BSI και SCI για τα μέτρα κεντρικής τάσης είναι τα εξής:

Πίνακας 7: Αριθμητικός μέσος, τυπικό σφάλμα αριθμητικού μέσου & επικρατούσα τιμή όλων των μεταβλητών

	C	pH	Salts	NDVI	BSI	SCI
Mean	23,37	6,71	0,18	0,37	104,72	0,92
Std. Error of Mean	0,93	0,09	0,01	0,13	0,11	0,01

<sup>13</sup> Αποτελεί το κατ' εξοχήν επίσημο λογισμικό, το οποίο έχει αναπτυχθεί για τις ανάγκες διαχείρισης, επεξεργασίας και ανάλυσης δορυφορικών εικόνων Sentinel.

<sup>14</sup> Θεωρείται ένα από τα πιο διαδεδομένα και γνωστά προγράμματα για τη στατιστική ανάλυση δεδομένων, που δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα δημιουργίας αναφορών, μοντελοποίησης και ανάλυσης δεδομένων αλλά και τη γραφική αναπαράσταση αυτών. Το πακέτο αυτό προσφέρει ένα μεγάλο αριθμό στατιστικών συναρτήσεων μέσα από ένα φιλικό - γραφικό περιβάλλον για το χρήστη.

Mode	20	7,2	0,01	0,13	101,26	-0,07
------	----	-----	------	------	--------	-------

Η διάμεσος μίας κατανομής είναι η τιμή της μεταβλητής που χωρίζει τα δεδομένα σε δύο ίσα μέρη, δηλαδή τα μισά έχουν υψηλότερες τιμές και τα υπόλοιπα χαμηλότερες τιμές από αυτήν. Πρόκειται για τη μεσαία παρατήρηση κι επομένως κατέχει την κεντρική θέση του δείγματος (βλ. Πίνακα 8).

Πίνακας 8: Διάμεσος όλων των μεταβλητών

	C	pH	Salts	NDVI	BSI	SCI
Median	22	7	0,02	0,37	104,72	0,10

Τα μέτρα κεντρικής τάσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την περιγραφή ενός συνόλου δεδομένων. Προκειμένου, όμως, να γίνει η περιγραφή μιας κατανομής είναι απαραίτητο να συμπληρώνονται με μέτρα, τα οποία υπολογίζουν τη διαφοροποίηση (μεταβλητότητα) των τιμών της μεταβλητής μεταξύ των παρατηρήσεων. Τα μέτρα που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό ονομάζονται μέτρα διασποράς και παρέχουν συνήθως πληροφορίες για την εξάπλωση των τιμών σε σχέση με τα μέτρα κεντρικής τάσης, δηλαδή πόσο διασκορπισμένα είναι τα δεδομένα σε σχέση με το κέντρο της κατανομής (Ηλιοπούλου, 2015). Στην κατηγορία αυτήν ανήκουν: το εύρος (range), το ενδοτεταρτημοριακό εύρος (interquartile range), η διακύμανση (variance) και η τυπική απόκλιση (standard deviation).

Το πιο απλό μέτρο διασποράς είναι το εύρος, που ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της μικρότερης και της μεγαλύτερης τιμής ενός συνόλου δεδομένων και εκφράζει το διάστημα μέσα στο οποίο κυμαίνονται οι τιμές των παρατηρήσεων. Τα αποτελέσματα σύμφωνα με τον Πίνακα 9 είναι τα εξής:

Πίνακας 9: Εύρος όλων των μεταβλητών

	C	pH	Salts	NDVI	BSI	SCI
Range	38	3,1	0,05	0,49	6,94	0,31
Minimum	10	4,6	0,01	0,13	101,26	-0,07
Maximum	48	7,7	0,06	0,63	108,19	0,24

Αντιθέτως, το ενδοτεταρτημοριακό εύρος (IQR) ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του τρίτου (Q3) και του πρώτου (Q1) τεταρτημορίου κι εκφράζει το διάστημα μέσα στο οποίο βρίσκεται το 50% των παρατηρήσεων, δηλαδή  $IQR = Q3 - Q1$ .

Πίνακας 10: Ενδοτεταρτημοριακό εύρος όλων των μεταβλητών

	C	pH	Salts	NDVI	BSI	SCI
Interquartile range	8	0,8	0,01	0,14	0,85	0,70

Άλλο μέτρο διασποράς θεωρείται η διακύμανση, ή αλλιώς διασπορά και είναι το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων διαιρεμένο με τον αριθμό των παρατηρήσεων. Η τυπική απόκλιση συνδέεται άμεσα με τη αυτήν και είναι το χρησιμότερο μέτρο διασποράς, καθώς πρόκειται για την τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης.

**Πίνακας 11: Διακύμανση & τυπική απόκλιση όλων των μεταβλητών**

	C	pH	Salts	NDVI	BSI	SCI
Variance	58,45	0,57	0	0,01	0,85	0,01
Standard deviation	7,64	0,75	0,01	0,11	0,92	0,05

Σε κάθε στατιστικό έλεγχο υπάρχει μία σημαντική υπόθεση, η μηδενική υπόθεση ( $H_0$ ) και το ενδιαφέρον εστιάζεται στο αν μπορεί να γίνει αποδεκτή η υπόθεση αυτή με βάση τα δεδομένα που υπάρχουν ή να απορριφθεί, εφόσον δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία. Μία σημαντική τιμή που χρησιμοποιείται στους στατιστικούς ελέγχους είναι το p-value. Γενικά ισχύει ότι αν το p-value ενός ελέγχου είναι μικρότερο από το επίπεδο σημαντικότητας ( $\alpha=0,05$ ), τότε η  $H_0$  απορρίπτεται, ενώ γίνεται αποδεκτή στην αντίθετη περίπτωση (Συμεωνάκη, 2015).

Στη συγκεκριμένη εργασία, για να αποφασιστεί αν ισχύει η  $H_0$ , δηλαδή ότι οι μεταβλητές (άργλιος, pH, άλατα, NDVI, BSI και SCI) ακολουθούν κανονική κατανομή, εξετάζεται η τιμή στη στήλη Sig. του κριτηρίου Kolmogorov – Smirnov, δεδομένου ότι οι παρατηρήσεις κάθε μεταβλητής ξεπερνούν τις 50 (στο σύνολο είναι 68 για κάθε μεταβλητή). Αν η τιμή Sig. είναι μικρότερη από το 0,05, τότε η  $H_0$  απορρίπτεται, αλλιώς γίνεται αποδεκτή (Συμεωνάκη, 2015).

**Πίνακας 12: Στατιστικός έλεγχος Kolmogorov - Smirnov**

	Tests of Normality					
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
C	,184	67	,000	,896	67	,000
pH	,181	67	,000	,874	67	,000
Salts	,250	67	,000	,735	67	,000
NDVI	,075	67	,200*	,983	67	,474
BSI	,103	67	,072	,929	67	,001
SCI	,093	67	,200*	,971	67	,121

\*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Σύμφωνα με τον Πίνακα 12, η μηδενική υπόθεση γίνεται αποδεκτή μόνο στις περιπτώσεις των δεικτών NDVI, BSI και SCI, καθώς εμφανίζουν τιμή μεγαλύτερη του

0,05 (<0,2 και 0,07). Επομένως, χρειάζεται περαιτέρω παρακολούθηση των μεταβλητών αυτών για το αν ακολουθούν κανονική κατανομή ή όχι. Οι υπόλοιπες μεταβλητές παρουσιάζουν τιμές μικρότερες του 0,05 (η  $H_0$  απορρίπτεται) και συνεπώς δεν ακολουθούν κανονική κατανομή.

Άλλοι τρόποι που επιβεβαιώνουν ότι η πλειοψηφία των μεταβλητών δεν ακολουθεί κανονική κατανομή είναι η ασυμμετρία (skewness), η κύρτωση (kurtosis) και το διάγραμμα ποσοστιαίων σημείων (Q-Q plot). Πιο αναλυτικά, με την ασυμμετρία ελέγχεται κατά πόσο οι τιμές μίας μεταβλητής κατανέμονται συμμετρικά γύρω από κάποιο μέτρο κεντρικής τάσης. Έτσι, η κατανομή ενός συνόλου δεδομένων μπορεί να θεωρηθεί συμμετρική (τιμή=0), όταν ο αριθμητικός μέσος, η διάμεσος και η επικρατούσα τιμή συμπίπτουν και μη συμμετρική, εάν ένα από τα τμήματα στα οποία χωρίζεται η κατανομή περιέχει περισσότερες παρατηρήσεις από το άλλο. Η μη συμμετρική κατανομή διακρίνεται επίσης στη θετικά ασύμμετρη (τιμή>0), η οποία παρουσιάζει μεγαλύτερες συχνότητες στις χαμηλές τιμές εύρους και στην αρνητικά ασύμμετρη (τιμή<0), που εμφανίζει μεγαλύτερες συχνότητες στις υψηλές τιμές εύρους (Καραγεώργος, 2010).

Πίνακας 13: Ασυμμετρία όλων των μεταβλητών

	C	pH	Salts	NDVI	BSI	SCI
Skewness	1,29	-1,21	1,91	0,32	-0,06	-0,38
Std. error of skewness	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29

Σύμφωνα με τον Πίνακα 13, καμία από τις μεταβλητές δεν παρουσιάζει τιμή ίση με 0. Παρ' όλα αυτά, οι μεταβλητές *NDVI*, *BSI* και *SCI* επειδή δεν αποκλίνουν περισσότερο της μισής μονάδας θα μπορούσαν να θεωρηθούν σχεδόν συμμετρικές κι επομένως να πλησιάζουν την κανονική κατανομή. Ιδιαίτερα η μεταβλητή *BSI* βρίσκεται αρκετά κοντά στο μηδέν (-0,06).

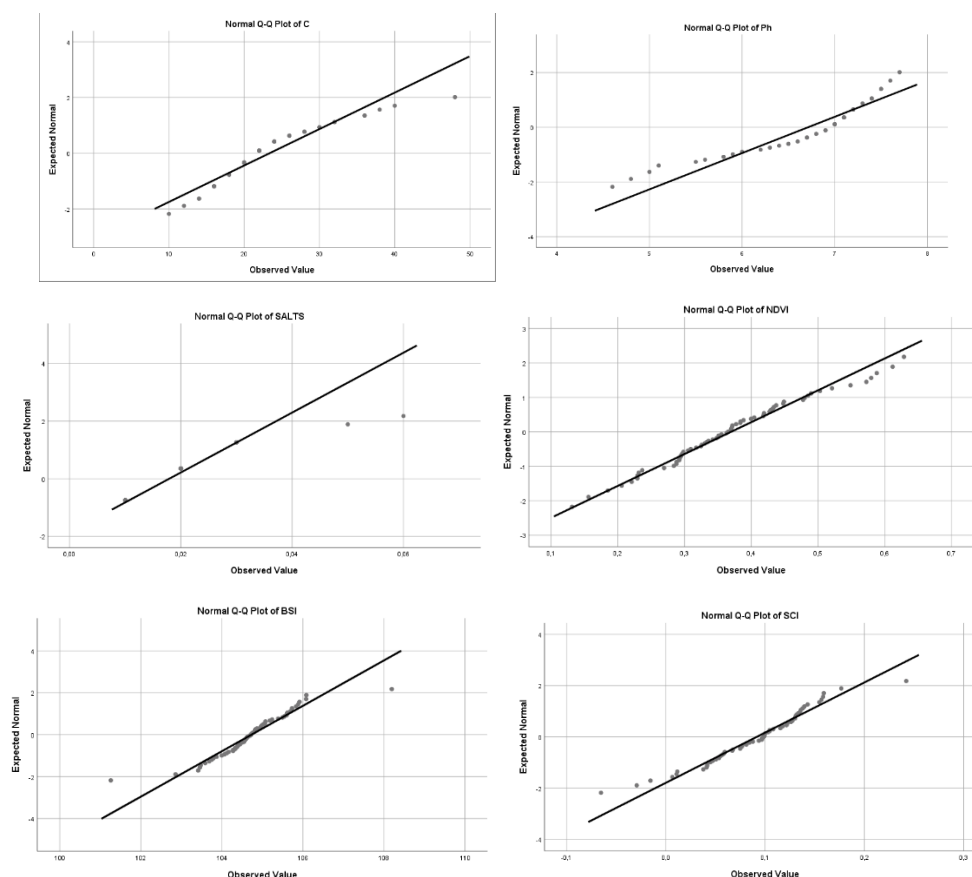
Η κύρτωση αφορά το βαθμό συγκέντρωσης των δεδομένων γύρω από το μέσο και τα άκρα της κατανομής και δείχνει εάν τα δεδομένα σχηματίζουν κορυφή ή είναι επίπεδα σε σχέση με μια κανονική κατανομή. Μια κατανομή, η οποία έχει σχετικά μεγάλη συχνότητα (κορυφή) και επομένως μεγάλη συγκέντρωση τιμών γύρω από τον μέσο, λέγεται λεπτόκυρτη (τιμή>3), ενώ αν έχει σχετικά μικρή συχνότητα, λέγεται πλατύκυρτη (τιμή<3). Η κανονική κατανομή ονομάζεται και μεσόκυρτη (τιμή=3) (Καραγεώργος, 2010).

Πίνακας 14: Κύρτωση όλων των μεταβλητών

	C	pH	Salts	NDVI	BSI	SCI
Kurtosis	1,96	0,76	5,59	0,04	4,48	1,28
Std. error of kurtosis	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58

Σύμφωνα με τον Πίνακα 14, καμία μεταβλητή δεν εμφανίζει τιμή κοντά στο 3 κι επομένως δε θα μπορούσαν να θεωρηθούν μεσόκυρτες. Τα άλατα και ο δείκτης γυμνού εδάφους (BSI) παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες του 3 κι έτσι θα έλεγε κανείς πως η κατανομή τους είναι λεπτόκυρτη. Οι υπόλοιπες μεταβλητές εμφανίζουν τιμές μικρότερες του 3 και συνεπώς η κατανομή τους ανήκει στην κατηγορία των πλατύκυρτων.

Το διάγραμμα Q-Q plot βοηθά στο να ελεγχθεί οπτικά αν ένα σύνολο δεδομένων προέρχεται από την κανονική κατανομή (Συμεωνάκη, 2015). Μεγάλη απόκλιση των σημείων από τη διαγώνιο φανερώνει ότι τα δεδομένα δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή. Επίσης, είναι δυνατόν να ανιχνευτούν και οι ακραίες τιμές των μεταβλητών.



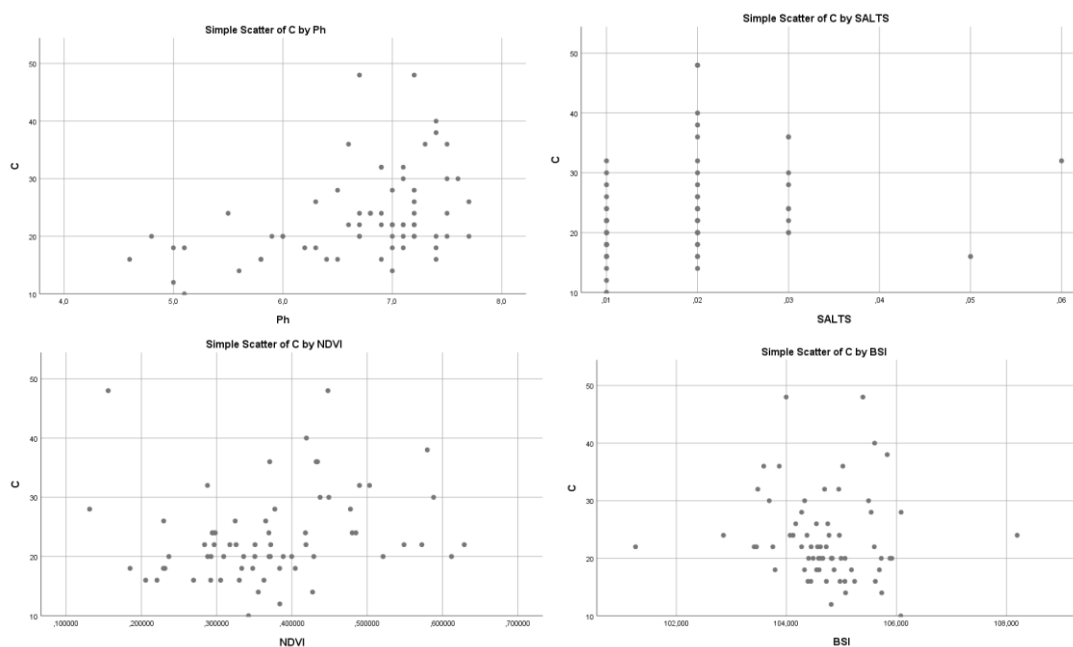
Διαγράμματα 5: Q-Q plot



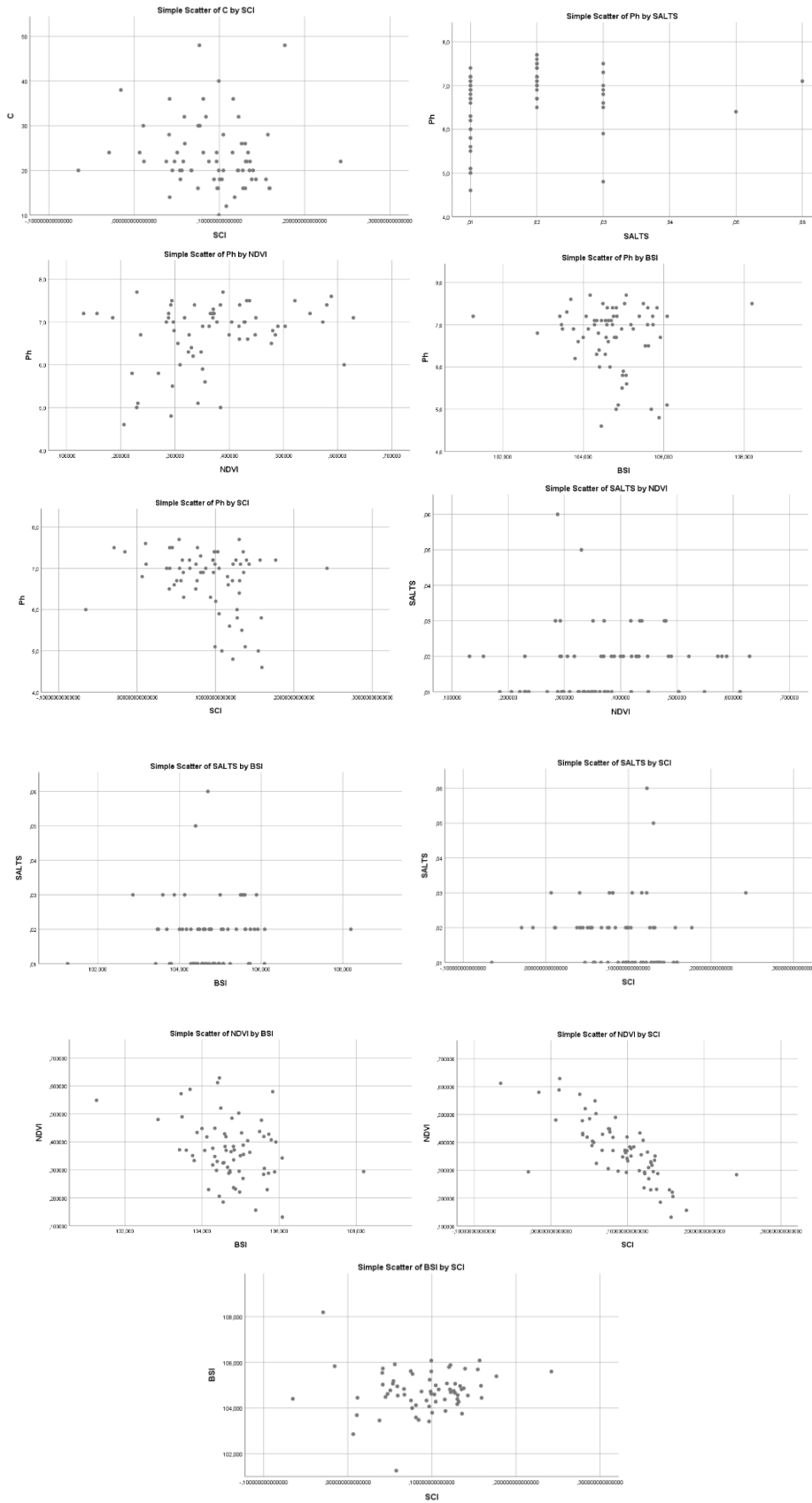
Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό ότι οι τιμές των μεταβλητών αργίλου, pH και αλάτων αποκλίνουν σημαντικά από τη διαγώνιο κι επομένως μπορεί να επιβεβαιωθεί πως δεν ακολουθούν κανονική κατανομή. Στις μεταβλητές των δεικτών NDVI, BSI και SCI, αρκετές από τις παρατηρήσεις βρίσκονται πάνω στη διαγώνιο κι έτσι θα μπορούσαν να θεωρηθούν πως ακολουθούν κανονική κατανομή. Η παρουσία ακραίων τιμών είναι ιδιαίτερα αισθητή, ωστόσο οι παρατηρήσεις είναι ελάχιστες και δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

Σύμφωνα με τους παραπάνω στατιστικούς ελέγχους, οι δείκτες NDVI, BSI και SCI φαίνεται να ακολουθούν κανονική κατανομή, καθώς στο στατιστικό έλεγχο Kolmogorov – Smirnov εμφανίζουν τιμή μεγαλύτερη του 0,05, στην ασυμμετρία κοντά στο 0 και στο διάγραμμα Q-Q plot οι περισσότερες τιμές βρίσκονται πάνω στη διαγώνιο. Οι υπόλοιπες μεταβλητές δεν μπορεί να θεωρηθούν ότι ακολουθούν κανονική κατανομή.

Η συσχέτιση (correlation) μετρά την ένταση της σχέσης δύο μεταβλητών. Για την υλοποίησή της, τα διαγράμματα διασποράς (scatter plots) χρησιμοποιούνται πάντα πριν την ανάλυση της απλής συσχέτισης, προκειμένου να ελεγχθεί οπτικά η σχέση δύο μεταβλητών και επομένως να προκύψει το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει σχέση (τα σημεία είναι εντελώς διεσπαρμένα στο επίπεδο) ή υπάρχει μία καμπυλόγραμμη σχέση μεταξύ των μεταβλητών, οπότε τα δεδομένα δεν είναι κατάλληλα για ανάλυση γραμμικής συσχέτισης (Συμεωνάκη, 2015).



**Διαγράμματα 6: Διασπορά των μεταβλητών ανά ζεύγη**



Διαγράμματα 7: Διασπορά των μεταβλητών ανά ζεύγη (συνέχεια)

Από τα διαγράμματα διασποράς φαίνεται να υπάρχει σχέση μεταξύ των μεταβλητών και πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται μία θετικά μέτρια συσχέτιση μεταξύ άργιλου – pH και αρνητικά μέτρια συσχέτιση μεταξύ του ζεύγους: NDVI – SCI. Επίσης, παρατηρείται μία ασθενής θετική συσχέτιση στις μεταβλητές άργιλος – NDVI, pH – NDVI και BSI – SCI. Αρνητικά ασθενής συσχετίσεις παρατηρούνται μεταξύ των ζευγών: άργιλος – BSI, άργιλος – SCI, pH – BSI, pH – SCI και NDVI – BSI. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι μία θετική συσχέτιση υπάρχει στην περίπτωση που η αύξηση στις τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής προκαλεί αύξηση στις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής, ενώ μία αρνητική συσχέτιση προκαλεί μείωση στις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής, καθόσον οι τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής αυξάνονται. Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούνται τέτοιου είδους συσχετίσεις. Τα σημεία, επιπλέον, βρίσκονται σε μία ζώνη γύρω από μία νοητή ευθεία, σχετικά μέτριου πλάτους. Τα δεδομένα αυτά, λοιπόν, είναι κατάλληλα για ανάλυση απλά γραμμικής συσχέτισης.

Αντιθέτως, για τις μεταβλητές που συνδυάζονται με τα άλατα δεν ισχύει το ίδιο, όπως προηγουμένως. Στα διαγράμματα αυτά είναι φανερό ότι τα σημεία είναι διασκορπισμένα στο επίπεδο, άρα δεν έχει νόημα η περαιτέρω ανάλυση γραμμικής συσχέτισης.

Για να ποσοτικοποιηθεί μία σχέση ή καλύτερα για τη μέτρηση της έντασής της αριθμητικά, χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson,  $r$ . Ο συντελεστής συσχέτισης  $r$  παίρνει τιμές μεταξύ του  $-1$  και του  $+1$ . Οι διαφορετικές τιμές του  $r$  υποδηλώνουν τα εξής:

- $r = +1$ : τέλεια θετική συσχέτιση (όλα τα σημεία βρίσκονται σε μία ευθεία γραμμή),
- $r$  μεταξύ του  $0$  και του  $1$ : θετική, αλλά όχι τέλεια συσχέτιση,
- $r = 0$ : καμία συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών,
- $r$  μεταξύ του  $-1$  και του  $0$ : αρνητική, αλλά όχι τέλεια συσχέτιση και
- $r = -1$ : τέλεια αρνητική συσχέτιση (όλα τα σημεία βρίσκονται σε μία ευθεία γραμμή).

Όσο πιο κοντά στο  $+1$  ή στο  $-1$  βρίσκεται ο συντελεστής, τόσο ισχυρότερη είναι η σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Τιμές κοντά στο μηδέν δείχνουν μία πολύ ασθενή σχέση (Συμεωνάκη, 2015).

Απαραίτητη προϋπόθεση εφαρμογής του είναι οι μεταβλητές να ακολουθούν κανονική κατανομή, καθώς και να υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών.

Ο συντελεστής συσχέτισης Spearman,  $\rho$ , από την άλλη πλευρά χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που δεν ισχύει η κανονικότητα των μεταβλητών (μη

παραμετρικός έλεγχος). Και σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής συσχέτισης παίρνει τιμές από -1 έως +1 και δίνει πληροφορίες για την κατεύθυνση της σχέσης (θετική ή αρνητική συσχέτιση), αλλά και την έντασή της σχέσης. Όσο πιο κοντά στο +1 ή στο -1 βρίσκεται ο συντελεστής, τόσο ισχυρότερη είναι η σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών, ενώ τιμές ίσες με το μηδέν δείχνουν πως δεν υπάρχει γραμμική σχέση.

Σύμφωνα με τους παραπάνω ελέγχους, οι μεταβλητές που ακολουθούν κανονική κατανομή είναι οι δείκτες NDVI, BSI και SCI και συνεπώς δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί ο συντελεστής συσχέτισης  $r$  με τις υπόλοιπες μεταβλητές, παρά μόνο μεταξύ τους.

Πίνακας 15: Ανάλυση συσχέτισης Pearson

		NDVI	BSI	SCI
NDVI	Pearson Correlation	1	-,338**	-,764**
	Sig. (2-tailed)		,005	,000
	N	68	68	68
BSI	Pearson Correlation	-,338**	1	,052
	Sig. (2-tailed)	,005		,671
	N	68	68	68
SCI	Pearson Correlation	-,764**	,052	1
	Sig. (2-tailed)	,000	,671	
	N	68	68	68

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων διασποράς επιβεβαιώνονται και στα αποτελέσματα ανάλυσης συσχέτισης. Ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson κυμαίνεται από -0,764 – -0,338 στους συνδυασμούς NDVI – BSI και NDVI – SCI, που αντιστοιχούν σε μέτρια/ ασθενή αρνητική γραμμική συσχέτιση. Το p-value είναι μικρότερο του 0,05 (0,005 και 0,000) που σημαίνει ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ των μεταβλητών, κάτι το οποίο δε συμβαίνει στην περίπτωση των SCI – BSI. Εκεί ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson είναι κοντά στο 0 και το p-value είναι αρκετά μεγαλύτερο του 0,05. Επομένως, δεν υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ των μεταβλητών.

Πίνακας 16: Ανάλυση συσχέτισης Spearman

		C	pH	Salts	NDVI	BSI	SCI
C	Spearman's rho Correlation	1,000	,441**	,359*	,325**	-,226	-,221
	Sig. (2-tailed)	.	,000	,003	,007	,066	,073
	N	67	67	67	67	67	67

Ph	Spearman's rho Correlation	,441**	1,000	,311*	,232	-,070	- ,266*
	Sig. (2-tailed)	,000	.	,010	,059	,575	,029
	N	67	67	67	67	67	67
SALTS	Spearman's rho Correlation	,359**	,311*	1,000	,232	,040	-,224
	Sig. (2-tailed)	,003	,010	.	,059	,746	,069
	N	67	67	67	67	67	67
NDVI	Spearman's rho Correlation	,325**	,232	,232	1,000	-,287*	- ,793*
	Sig. (2-tailed)	,007	,059	,059	.	,018	,000
	N	67	67	67	68	68	68
BSI	Spearman's rho Correlation	-,226	-,070	,040	-,287*	1,000	,120
	Sig. (2-tailed)	,066	,575	,746	,018	.	,328
	N	67	67	67	68	68	68
SCI	Spearman's rho Correlation	-,221	-,266*	-,224	-,793**	,120	1,000
	Sig. (2-tailed)	,073	,029	,069	,000	,328	.
	N	67	67	67	68	68	68

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

\* . Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Τα αποτελέσματα, που θα πρέπει να ληφθούν καλύτερα υπόψη, είναι αυτά που εμφανίζονται στον Πίνακα 16 με την ανάλυση συσχέτισης του Spearman, καθώς η πλειοψηφία των μεταβλητών δεν ακολουθούν κανονική κατανομή. Τα μόνα ζεύγη που κρίθηκαν κατάλληλα για την ανάλυση αυτήν ήταν τα: άργιλος – pH, άργιλος – άλατα, άργιλος – NDVI, pH – άλατα, pH – SCI, NDVI – BSI και NDVI – SCI. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι πανομοιότυπα με αυτά που προέκυψαν από τα διαγράμματα διασποράς.

Ο συντελεστής συσχέτισης rho κυμαίνεται από -0,793 – 0,575 , που αντιστοιχεί σε μέτρια, ίσως και ισχυρή θετική/ αρνητική γραμμική συσχέτιση. Πιο αναλυτικά, οι μεταβλητές NDVI – SCI εμφανίζουν ισχυρή προς μέτρια αρνητική συσχέτιση, με τιμή -0,793 και πιο ασθενή συσχέτιση τα ζεύγη pH – SCI και NDVI – BSI με τιμές -0,266 και -0,287 αντίστοιχα. Από την άλλη πλευρά, ασθενής θετική συσχέτιση παρουσιάζουν η άργιλος και το pH (0,441). Το p-value σε όλες αυτές τις περιπτώσεις δεν ξεπερνά το 0,05 που σημαίνει ότι υπάρχει στατιστικά σημαντική σχέση μεταξύ των μεταβλητών.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις, επειδή υπάρχουν μεταβλητές που συσχετίζονται μεταξύ τους, χρειάζεται να περιοριστεί το πλήθος των στοιχείων των μεταβλητών σε μία μικρότερη ομάδα με δυναμικές ιδιότητες. Η μείωση αυτή επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση του συνολικού πλήθους των εμπλεκόμενων (ανεξάρτητων) μεταβλητών σε μία νέα ομάδα, που αποτελείται από λιγότερες μεταβλητές, οι οποίες είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, αλλά όμως παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των αρχικών μεταβλητών. Υπάρχουν δύο στατιστικές μέθοδοι που ασχολούνται με τη μείωση του πλήθους των μεταβλητών: η παραγοντική ανάλυση (Factor Analysis (FA)) και η ανάλυση κύριων συνιστωσών (Principal Component Analysis (PCA)).

Η παραγοντική ανάλυση περιγράφει τη διακύμανση ενός αριθμού εμφανώς συσχετιζόμενων μεταβλητών στη βάση ενός μικρότερου αριθμού μεταβλητών (που δε γίνονται αντιληπτές), οι οποίες καλούνται παράγοντες. Για παράδειγμα, έστω ότι τέσσερις εμφανείς μεταβλητές (που είναι γνωστές) εκφράζουν τη μεταβλητότητά τους σε δυο λανθάνουσες μεταβλητές (κρυφές). Η παραγοντική ανάλυση εξετάζει τις εμφανείς μεταβλητές ως γραμμικούς συνδυασμούς των δυο παραγόντων. Ένα καλό παράδειγμα χρήσης της παραγοντικής ανάλυσης είναι η συνέντευξη σε πολίτες ενός προαστίου της Αθήνας σχετικά με την επιρροή που θα είχε η εγκατάσταση ενός πολυκαταστήματος (mall) με βάση ένα ερωτηματολόγιο, το οποίο θα αποτελείται από ομάδες διαφόρων κατηγοριών (πχ. οικονομική κατάσταση της περιοχής, δημογραφία, υποδομές).

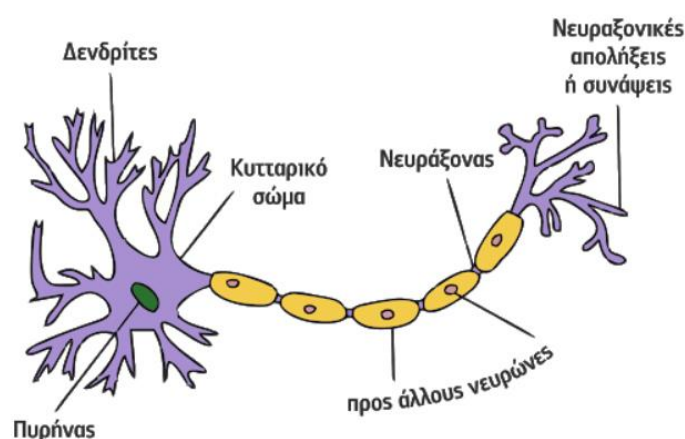
Η ανάλυση κύριων συνιστωσών (που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα πτυχιακή εργασία) είναι μία στατιστική μέθοδος, η οποία μετατρέπει τις τιμές της ομάδας των ανεξάρτητων μεταβλητών, που είναι δυνητικά συσχετιζόμενες, σε μία ομάδα νέων τιμών μη γραμμικά συσχετιζόμενων μεταβλητών, οι οποίες ονομάζονται κύριες συνιστώσες. Ο αριθμός των νέων μεταβλητών είναι, συνήθως, μικρότερος από τον αριθμό των αρχικών μεταβλητών. Ως παράδειγμα για τη χρήση της ανάλυσης κύριων συνιστωσών μπορεί να αποτελέσει η μελέτη του προφίλ ενός τρόφιμου. Οι Jolliffe (1990), Rencher & Christensen (2012) και Sharma (1996) περιέγραψαν λεπτομερώς και κατέγραψαν μετρήσεις των χαρακτηριστικών διαφορετικής προέλευσης, όπως η χημική σύσταση, οι ρεολογικές ιδιότητες, καθώς και χρωματομετρικές και οργανοληπτικές μεταβλητές. Στο σύνολο υπολογίστηκαν 18 μεταβλητές σε 32 δείγματα μαγιονέζας με διαφορετική σύνθεση η καθεμία. Το ερώτημα είναι αν από τις 18 μεταβλητές μπορούν να προσδιοριστούν κάποιες νέες συνιστώσες, οι οποίες θα έχουν την ικανότητα να περιγράψουν όσο το δυνατόν ακριβέστερα το δυνητικό αποτέλεσμα των αρχικών. Η μέθοδος θεωρείται επιτυχημένη, όταν η πρώτη συνιστώσα θα περιγράφεται ικανοποιητικά από τη συνεισφορά κάποιων αρχικών μεταβλητών, η δεύτερη από τη δράση διαφορετικών των πρώτων μεταβλητών κλπ, περιορίζοντας έτσι στο ελάχιστο την ανεξαρτησία κάθε αρχικής μεταβλητής. Αντίστοιχες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί και εφαρμοστεί με

επιτυχία για την υφή μαρμελάδας ροδάκινου (Raphaelides, 1996), την οργανοληπτική εκτίμηση της ποιότητας οίνου παρασκευασμένου από ακτινίδια (Soufleros, 2001) και την επίδραση των πρωτόζωων στην ενεργό ιλύ (Papadimitriou, 2011).

#### 4.2.3. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks) είναι υπολογιστικά μοντέλα, τα οποία προσπαθούν να προσομοιάσουν και να μιμηθούν τον τρόπο με τον οποίο δουλεύει ο ανθρώπινος εγκέφαλος, καθώς και τον τρόπο που λειτουργεί η αφηρημένη μαθηματική σκέψη (Χατζηχριστάκης, 2018). Ο εγκέφαλος είναι ένα αρκετά πολύπλοκο σύστημα που έχει την ικανότητα να οργανώνει τα στοιχειώδη δομικά του συστατικά (τους νευρώνες), προκειμένου να επιτυγχάνεται η εκτέλεση πολύπλοκων υπολογισμών και λειτουργιών σε ταχύτητες πολύ πιο γρήγορες από αυτές που μπορούν να επιτευχθούν ακόμα και με τον γρηγορότερο σημερινό υπολογιστή. Σκοπός της χρήσης των συγκεκριμένων μοντέλων είναι η επίλυση διαφόρων προβλημάτων και η εκτέλεση διεργασιών, γεγονός που επιτυγχάνεται μέσω της εκπαίδευσης τους.

Πιο αναλυτικά, ο εγκέφαλος αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων νευρώνων (νευρικά κύτταρα). Καθένας δέχεται ερεθίσματα (είσοδοι) από άλλους νευρώνες, που επηρεάζουν την κατάστασή του και ανάλογα με αυτή τη κατάσταση, στέλνει με τη σειρά του ερεθίσματα (έξοδοι) σε άλλους νευρώνες. Κάθε σύνδεση μεταξύ δύο νευρώνων χαρακτηρίζεται από μία τιμή ισχύος η οποία υποδηλώνει πόσο ισχυρή είναι η μεταξύ τους αλληλεπίδραση (Σαλάτας, 2011).

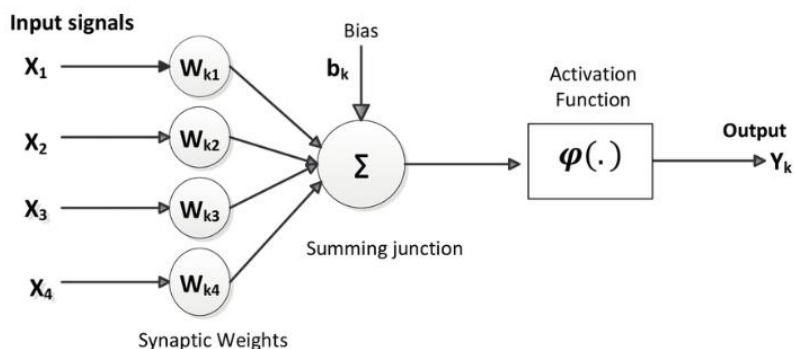


Εικόνα 15: Απεικόνιση βιολογικού νευρώνα

Πηγή: Χατζηχριστάκης, 2018

Σύμφωνα με τον βιολογικό νευρώνα ο Haykin (1994) όρισε το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ΤΝΔ) ως «έναν τεράστιο επεξεργαστή με κατανεμημένη αρχιτεκτονική (δίκτυο), ο οποίος αποτελείται από ένα πλήθος διασυνδεδεμένων μονάδων επεξεργασίας (τεχνητοί νευρώνες). Κάθε μονάδα επεξεργασίας

χαρακτηρίζεται από εισόδους και εξόδους. Υλοποιεί τοπικά έναν υπολογισμό με βάση τις εισόδους που δέχεται και μεταδίδει το αποτέλεσμα (έξοδος) σε άλλες μονάδες επεξεργασίας με τις οποίες συνδέεται. Οι τιμές των βαρών των συνδέσεων αποτελούν τη γνώση που είναι αποθηκευμένη στο ΤΝΔ και καθορίζουν τη λειτουργικότητά του. Συνήθως ένα ΤΝΔ αναπτύσσει μια συνολική λειτουργικότητα μέσω της εκπαίδευσης».



**Διάγραμμα 8: Απλοποιημένο μοντέλο τεχνητού νευρώνα**

Πηγή: Καζακλάρη κ.ά., 2020

Ο νευρώνας της Εικόνας 16 αποτελείται από  $k$  συνδέσεις εισόδου, καθεμία από τις οποίες δέχεται ένα σήμα εισόδου  $x_i$  ( $i=1,2,3,\dots, k$ ) και χαρακτηρίζεται από μία τιμή βάρους  $w_{ki}$  ( $i=1,2,3,\dots, k$ ), η οποία δηλώνει πόσο στενά είναι συνδεδεμένοι δύο νευρώνες. Η τιμή αυτή συνήθως κυμαίνεται στο διάστημα μεταξύ  $-1$  και  $1$ . Η είσοδος bias είναι μία σύνδεση σταθερής διέγερσης με τιμή που ισούται μονίμως με  $1$  και βάρος  $b_k$  που ονομάζεται πόλωση του νευρώνα. Η εισαγωγή της πόλωσης προσδίδει στο νευρώνα επιπλέον υπολογιστικές δυνατότητες μάθησης και προσαρμογής στα δεδομένα εκπαίδευσης (Σαλάτας, 2011).

Ο υπολογισμός που επιτελεί ένας νευρώνας διακρίνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, υπολογίζεται η συνολική είσοδος:

$$u(x) = \sum_{i=1}^k w_{ki} x_i + w_0.$$

Ενώ στο δεύτερο στάδιο εκτιμάται η έξοδος του νευρώνα μέσω μίας συνάρτησης ενεργοποίησης (activation function):

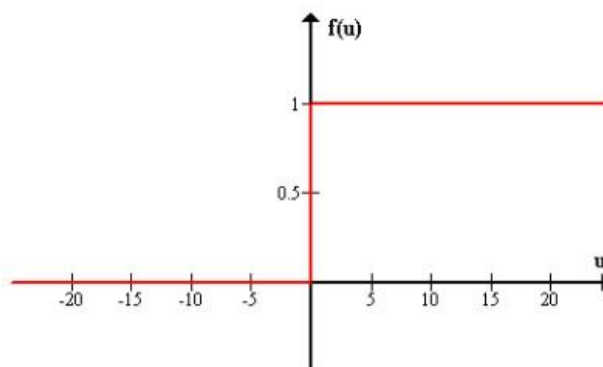
$$\phi: y_k = \phi(u).$$

Μία συνάρτηση ενεργοποίησης θεωρείται πως είναι η βηματική συνάρτηση ή συνάρτηση κατωφλιού (threshold function), η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$f(u) = \begin{cases} 1 & u \geq 0 \\ 0 & u < 0 \end{cases}$$



Πρόκειται για ένα μαθηματικό μοντέλο που αποτελείται από έναν αθροιστή και ένα μη-γραμμικό μετασχηματιστή.



**Διάγραμμα 9: Βηματική συνάρτηση**

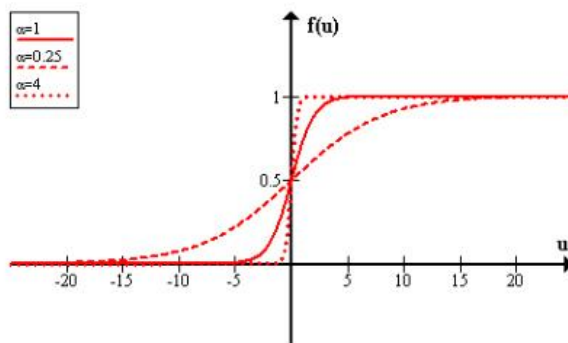
Πηγή: Σαλάτας, 2011

Η συνάρτηση ενεργοποίησης που χρησιμοποιεί αυτό το μοντέλο έχει ως βασικό μειονέκτημα ότι δεν είναι διαφορίσιμη, καθώς η παράγωγός της τείνει στο άπειρο.

Η μορφή που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην κατασκευή νευρωνικών δικτύων είναι η συνάρτηση σιγμοειδούς μορφής. Εκείνη δηλαδή που το γράφημά της παίρνει τη μορφή του γράμματος «ς» και είναι συνεχής και παραγωγίσιμη σε όλο το πεδίο ορισμού της. Μία τέτοια μορφή είναι η λογιστική συνάρτηση (logistic function), η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$f(u) = \frac{1}{1 + e^{-au}}$$

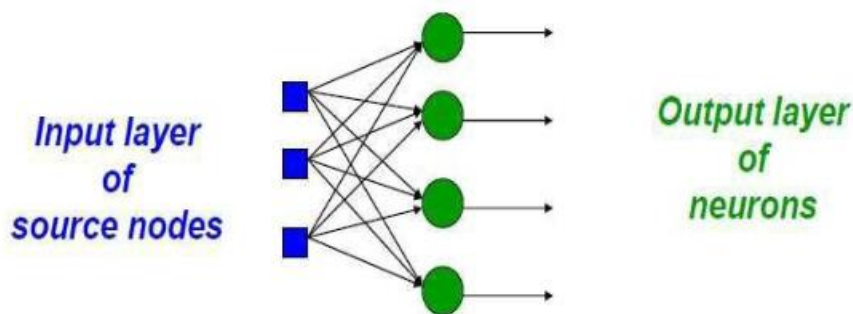
όπου α η κλίση της συνάρτησης, που συνήθως παίρνει την τιμή της μονάδας. Όταν η κλίση της συνάρτησης προσεγγίσει το άπειρο, η σιγμοειδής συνάρτηση μετατρέπεται σε βηματική. Έτσι, φαίνεται η ευελιξία και ισορροπία που διατηρεί αυτή η μορφή συνάρτησης τόσο με τη γραμμική, όσο και με τη μη-γραμμική (Καζακκάρη κ.ά., 2020).



**Διάγραμμα 10: Λογιστική συνάρτηση**

Πηγή: Σαλάτας, 2011

Η πιο απλή περίπτωση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ), που χρησιμοποιείται ευρέως, είναι τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (feedforward networks). Η ονομασία τους οφείλεται στο γεγονός ότι αποτελούνται από ένα επίπεδο εισόδου που καταλήγει απευθείας σε ένα επίπεδο εξόδου χωρίς αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ τους. Τα σήματα που εντοπίζονται στο επίπεδο εισόδου μεταβιβάζονται στο επίπεδο εξόδου με τις τιμές τους να έχουν μεταβληθεί εξαιτίας των βαρών. Τα δίκτυα αυτής της μορφής είναι ενός επιπέδου, καθώς δεν πραγματοποιούνται υπολογισμοί στο επίπεδο εισόδου.

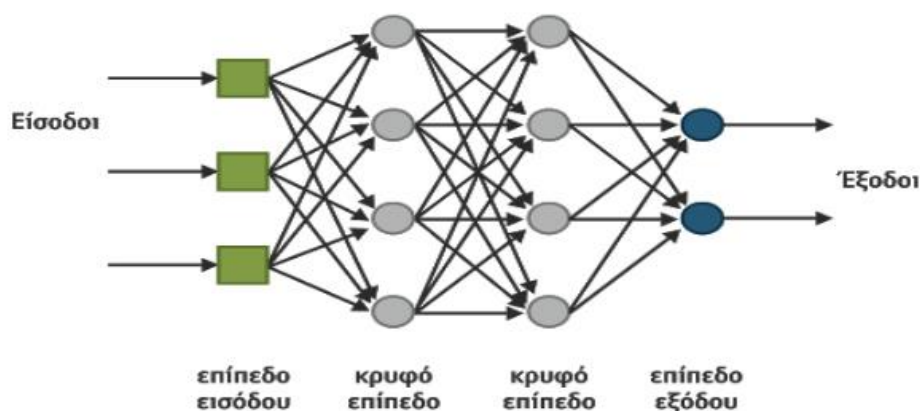


Διάγραμμα 11: Δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης  
Πηγή: Καζακλάρη κ.ά., 2020

Από τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατηγορία στην οποία οι νευρώνες είναι οργανωμένοι σε επίπεδα (layers). Πρόκειται για το πολυεπίπεδο πρόσθιας τροφοδότησης (multilayer perceptron (MLP)). Στο MLP δεν υπάρχει διασύνδεση μεταξύ νευρώνων που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο. Υπάρχουν οι νευρώνες του επιπέδου εισόδου, που δέχονται τα ερεθίσματα και τις πληροφορίες από το εξωτερικό περιβάλλον και τα αξιολογούν. Έπειτα, σε ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα στρώματα, γνωστά και ως κρυμμένα επίπεδα (hidden layers) εντοπίζεται ένα πλήθος νευρώνων που αποτελούν ένα μεταβατικό στάδιο μεταξύ των νευρώνων εισόδου και εξόδου. Αυτοί διαχειρίζονται και επεξεργάζονται τις πληροφορίες που τους έχουν μεταβιβάσει από το επίπεδο εισόδου με κατάλληλο τρόπο, ώστε να είναι αξιοποιήσιμες στο άλλο επίπεδο. Η ύπαρξη «κρυμμένων» επιπέδων παρέχει τη δυνατότητα στο δίκτυο να εξάγει υψηλότερης τάξης στατιστικά στοιχεία σε σχέση με αυτά που εισέρχονται σε αυτό. Στο τελευταίο επίπεδο (επίπεδο εξόδου) οι πληροφορίες που συλλέγονται από τα προηγούμενα στάδια αποτελούν τη συνολική απόκριση του δικτύου (Καζακλάρη κ.ά., 2020).

Σε κάθε επίπεδο οι πληροφορίες - σήματα που εισέρχονται στους νευρώνες είναι αποκλειστικά οι έξοδοι του αμέσως προηγούμενου επιπέδου. Συνήθως, όλες οι συνδέσεις ξεκινάνε από κάποιο νευρώνα σε ένα επίπεδο και καταλήγουν σε νευρώνες του αμέσως επόμενου επιπέδου. Όταν οι νευρώνες ενός επιπέδου είναι συνδεδεμένοι με κάθε νευρώνα του αμέσως επόμενου επιπέδου, τότε το νευρωνικό δίκτυο χαρακτηρίζεται ως *πλήρως συνδεδεμένο*, ενώ όταν απουσιάζουν ορισμένες συνδέσεις, το δίκτυο αποκαλείται *μερικώς συνδεδεμένο* (Σαλάτας, 2011).

Και σε αυτήν την κατηγορία δικτύου, οι νευρώνες δεν πραγματοποιούν κάποιον υπολογισμό στο επίπεδο εισόδου, παρά μόνο μεταδίδουν τις τιμές του επιπέδου εισόδου στους νευρώνες του επόμενου επιπέδου.

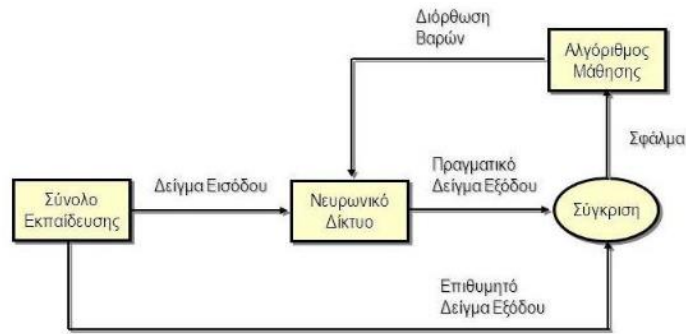


**Διάγραμμα 12: Πολυεπίπεδο πρόσθιας τροφοδότησης**

*Πηγή: Καζακλάρη κ.ά., 2020*

Μία μέθοδος εκπαίδευσης του MLP είναι με ελεγχόμενη – επιτηρούμενη εκμάθηση (supervised learning). Πρόκειται για έναν τύπο εκμάθησης όπου, πέρα από τις εισόδους, εισάγεται και η επιθυμητή έξοδος στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, το δίκτυο τροφοδοτείται με ζευγάρια διανυσμάτων εισόδου και εξόδου. Αρχικά, επιλέγονται οι τιμές των βαρών τυχαία και για κάθε νέο διάνυσμα εισόδου μεταβάλλονται, μέχρι η πραγματική με την επιθυμητή απόκριση του δικτύου να συγκλίνουν σε επιθυμητό επίπεδο. Η διαφορά αυτή ορίζεται ως *σήμα σφάλματος*. Τα σήματα σφαλμάτων φτάνουν στο επίπεδο εξόδου και σε περίπτωση μη επιθυμητής σύγκλισης επανατροφοδοτούνται προς τα πίσω, τροποποιώντας τα βάρη, ώστε να μην επαναληφθεί το ίδιο σφάλμα.

Με σκοπό τη βέλτιστη εκπαίδευση του δικτύου, εισάγονται στο επίπεδο εισόδου πολλά διανύσματα. Η διαδικασία εκμάθησης ολοκληρώνεται όταν τα βάρη δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες μεταβολές. Η αδυναμία του δικτύου να επιλύσει ένα πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την παρέμβαση του εκπαιδευτή, ο οποίος αναδιαμορφώνει τη δομή του δικτύου, έτσι ώστε να επιτευχθεί ένας ορθός τρόπος λειτουργίας του (Καζακλάρη κ.ά., 2020). Με την εκπαίδευση θα επέλθει μία σταθερότητα στα βάρη, όταν το νευρωνικό δίκτυο θα είναι ικανό να αντιμετωπίζει μόνο του το περιβάλλον του, χωρίς την παρέμβαση κάποιου εκπαιδευτή. Τα ελεγχόμενα νευρωνικά δίκτυα (supervised neural networks (SNN)), συνήθως, βρίσκουν εφαρμογή σε συναρτήσεις που εκφράζουν μη γραμμικές συσχετίσεις και σε προβλήματα ταξινόμησης (Ντότσικας, 2007).

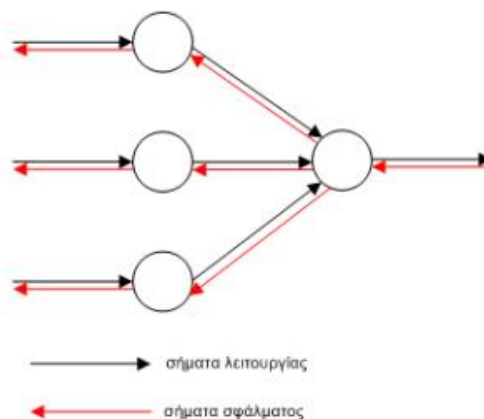


**Διάγραμμα 13: Ελεγχόμενη εκμάθηση**

Πηγή: Καζακλάρη κ.ά., 2020

Για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός δικτύου που ακολουθεί αυτή τη μορφή μάθησης επιλέγεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ή το άθροισμα του τετραγωνικού σφάλματος<sup>15</sup>(Καζακλάρη κ.ά., 2020). Σε ένα ΤΝΔ θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί η εκμάθηση, όταν προσεγγίζει την ανακρίβεια, την ασάφεια και το θόρυβο χωρίς σημαντική αρνητική επίδραση στην απόκριση, καθώς και όταν γενικεύει το στόχο για τον οποίο έγινε η εκμάθηση στην εφαρμογή σε άγνωστα δείγματα.

Τα πολυεπίπεδα πρόσθιας τροφοδότησης (MLP) είναι SNN δίκτυα, καθώς γίνεται χρήση του κανόνα διάδοσης του σφάλματος προς τα πίσω (back propagation), σύμφωνα με τον οποίο η προσαρμογή των βαρών πραγματοποιείται προς την κατεύθυνση που ελαχιστοποιεί το σφάλμα. Η συγκεκριμένη μορφή εκμάθησης χρησιμοποιεί πληθώρα διαφορετικών αλγορίθμων. Όσο πιο κοντά σε κάποιο τοπικό ελάχιστο κινείται το εκάστοτε σημείο, τόσο καλύτερα προσεγγίζει την βέλτιστη απόδοση. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε ένα από τα δεδομένα εισόδου σε κάθε κύκλο εκπαίδευσης<sup>16</sup>(Ντότσικας, 2007).



**Διάγραμμα 14: Η κατεύθυνση ροής των δύο σημάτων κατά την εκπαίδευση του MLP**

Πηγή: Σαλάτας, 2011

<sup>15</sup> Πρόκειται για μία συσχέτιση μεταξύ μιας επιφάνειας σφάλματος και της απόδοσης του συστήματος.

<sup>16</sup> Η διόρθωση των βαρών για όλα τα παραδείγματα της ομάδας εκμάθησης.

Η ελαστικότητα των ΤΝΔ να επιδίδονται με υψηλή ακρίβεια σε προβλήματα πρόβλεψης, επεξεργασίας, αλλά και ομαλοποίησης μεγάλου όγκου δεδομένων, τους έχει προσδώσει το πλεονέκτημα να βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς, συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο στη διερεύνηση διαφόρων ζητημάτων.

Ιδιαίτερα έχουν συμβάλει στη διάγνωση διαφόρων ασθενειών, όπως ο σακχαρώδης διαβήτης και ο καρκίνος του μαστού, στην αναγνώριση ακτινογραφιών, δίνοντας πολύτιμα και ελπιδοφόρα αποτελέσματα στον κλάδο της Ιατρικής. Η επιστήμη της βιολογίας έχει διευκολυνθεί μέσω αυτών των μοντέλων για ζητήματα που αφορούν το γενετικό υλικό (πιθανές μεταλλάξεις), καθώς και τη μοντελοποίηση ορισμένων λειτουργιών του εγκεφάλου, που είναι δύσκολο να προσδιοριστούν και να γίνουν εύκολα αντιληπτές εξαιτίας της πολυπλοκότητας του.

Ένας ακόμη τομέας που αξιοποιεί τα ΤΝΔ είναι η οικονομία και πιο συγκεκριμένα το χρηματιστήριο, για την πρόβλεψη της διακύμανσης των τιμών των μετοχών. Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ακόμη σε μετεωρολογικές προβλέψεις, στην ενίσχυση των αμυντικών μηχανισμών των κρατών, αλλά και τη βελτίωση των συνθηκών των αερομεταφορών κ.ά.

Τέλος, με αφορμή την παρούσα πτυχιακή εργασία, θα γίνει εκτίμηση της οργανικής ουσίας του εδάφους με τη βοήθεια των MLP δικτύων, αποτελώντας παράλληλα και ένα εργαλείο για την κλιματική αλλαγή.

### 5.3. Αποτελέσματα τεχνητών νευρικών δικτύων με SPSS

Από το σύνολο των δεδομένων της περιοχής χρησιμοποιήθηκε το 70% αυτών (για εκπαίδευση του μοντέλου), ώστε με το υπόλοιπο 30% να γίνει μία επαλήθευση της προσαρμοστικότητάς του. Πριν τη δημιουργία του μοντέλου MLP, έγινε ανάλυση των κύριων συνιστωσών, ώστε να μετατραπούν οι τιμές της ομάδας των παραπάνω μεταβλητών, που είναι δυνητικά συσχετιζόμενες, σε μία ομάδα νέων τιμών μη γραμμικά συσχετιζόμενων, οι οποίες ονομάζονται κύριες συνιστώσες.

Στον πίνακα *Communalities* δίνεται ο συντελεστής προσαρμογής (Extraction) κάθε μεταβλητής του δικτύου MLP. Αν ο αριθμός αυτός ξεπερνά την τιμή 0,60 σημαίνει ότι η μεταβλητή προσαρμόζεται καλά στο μοντέλο, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να εξαιρεθεί και να γίνει ανάλυση μόνο σε όσες εμφανίζουν τιμή μεγαλύτερη του 0,60.

Πίνακας 17: Συντελεστής προσαρμογής κάθε μεταβλητής

	Communalities	
	Initial	Extraction
C	1,000	,630
Ph	1,000	,568

SALTS	1,000	,511
NDVI	1,000	,882
BSI	1,000	,202
SCI	1,000	,748

Extraction Method: Principal

Component Analysis.

Είναι εμφανές από τον παραπάνω πίνακα ότι μόνο οι τιμές των μεταβλητών *άργιλος* (0,630), *NDVI* (0,882) και *SCI* (0,748) υπερβαίνουν το όριο του 0,60 κι επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη δημιουργία νευρωνικού δικτύου. Οι υπόλοιπες αφαιρέθηκαν, προκειμένου να ερμηνευθεί σωστά η μέθοδος PCA,.

Στον πίνακα *Total Variance Explained* δίνεται το ποσοστό ερμηνείας κάθε παράγοντα. Όπως φαίνεται στην περιοχή του Μαλανδρίνο, ο πρώτος ερμηνεύει το 37% (36,96), ο δεύτερος το 22% (22,06) κλπ. Διατηρούνται όσες έχουν Eigenvalue μεγαλύτερη από της μονάδας. Η τέταρτη στήλη (cumulative%) δίνει την αθροιστική ερμηνευτική ικανότητα.

Πίνακας 18: Ποσοστό ερμηνείας κάθε παράγοντα

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
	1	2,22	36,96	36,96	2,22	36,96
2	1,32	22,06	59,02	1,32	22,06	59,02
3	,98	16,31	75,33			
4	,76	12,68	88,01			
5	,56	9,27	97,27			
6	,16	2,73	100,00			

Σύμφωνα με τον Πίνακα 18, διατηρούνται 2 συνιστώσες.

Ο πίνακας με την ονομασία *Component Matrix* είναι ο κεντρικός πίνακας, που ερμηνεύει τη μέθοδο PCA και από αυτόν προκύπτουν οι συνιστώσες.

Πίνακας 19: Τιμές των συνιστωσών που αντιστοιχούν σε κάθε μεταβλητή

	Component Matrix <sup>a</sup>	
	Component 1	Component 2
C	,537	,585
Ph	,649	,384

SALTS	,319	,640
NDVI	,843	-,413
BSI	-,364	,263
SCI	-,750	,430

Extraction Method: Principal

Component Analysis.<sup>a</sup>

a. 2 components extracted.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 19, στην πρώτη κύρια συνιστώσα συμμετέχουν θετικά σε μεγάλο βαθμό οι μεταβλητές *άργιλος*, *NDVI* και *pH* και αρνητικά ο δείκτης χρωματισμού εδάφους (*SCI*). Στη δεύτερη κύρια συνιστώσα είναι εμφανώς ενεργή η συμμετοχή των μεταβλητών αργίλου και αλάτων.

Σε επόμενο στάδιο, δημιουργείται το μοντέλο του πολυεπίπεδου πρόσθιας τροφοδότησης (MLP). Στον αρχικό πίνακα *Case Processing Summary* απεικονίζονται οι παρατηρήσεις που συμμετέχουν στην ανάλυση και αναγράφονται δίπλα από την ένδειξη *Valid* (100%). Από τις 67 παρατηρήσεις οι 50 χρησιμοποιήθηκαν για εκπαίδευση του μοντέλου (74,6%) και οι υπόλοιπες 17 για επαλήθευση (25,4%).

Πίνακας 20: Το σύνολο των παρατηρήσεων που συμμετέχει στο MLP

		N	Percent
Sample	Training	50	74,6%
	Testing	17	25,4%
Valid		67	100,0%
Excluded		1	
Total		68	

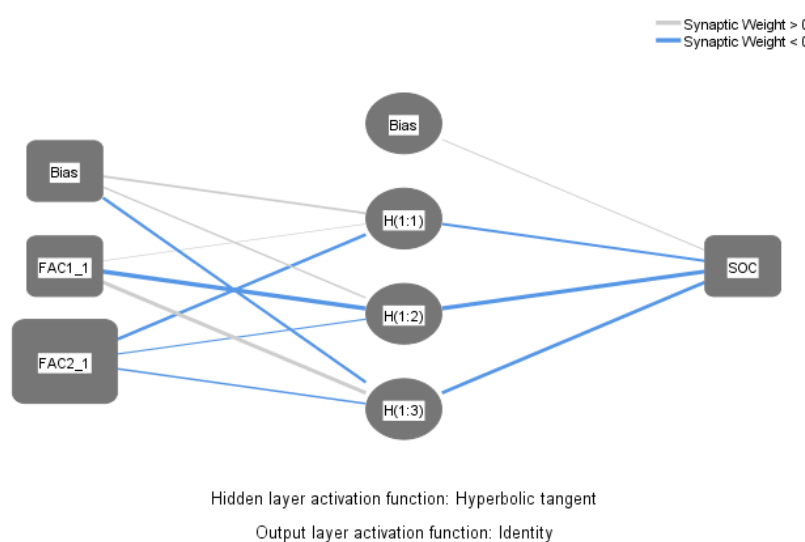
Στον πίνακα *Network Information* αναγράφονται οι πληροφορίες σχετικά με το νευρωνικό δίκτυο που διασφαλίζει ότι οι προδιαγραφές είναι σωστές. Συγκεκριμένα, δείχνει τον αριθμό των νευρώνων σε κάθε επίπεδο και τις δύο ανεξάρτητες μεταβλητές (πρώτη και δεύτερη κύρια συνιστώσα της PCA). Η *αυτόματη επιλογή αρχιτεκτονικής* του δικτύου επέλεξε 3 κόμβους για το κρυμμένο επίπεδο και έναν για το επίπεδο εξόδου της εξαρτώμενης μεταβλητής (οργανική ουσία). Για το κρυμμένο επίπεδο χρησιμοποιήθηκε ως συνάρτηση ενεργοποίησης η *Hyperbolic tangent*, ενώ για το επίπεδο εξόδου η *Identity*. Το άθροισμα τετραγώνων χρησιμοποιήθηκε ως συνάρτηση σφάλματος λόγω της χρήσης της συνάρτησης *Identity*.

Πίνακας 21: Πληροφορίες νευρωνικού δικτύου

Network Information			
Input Layer	Covariates	1	factor score 1 for analysis 1
		2	factor score 2 for analysis 1
	Number of Units <sup>a</sup>		2
	Rescaling Method for Covariates		Standardized
Hidden Layer(s)	Number of Hidden Layers		1
	Number of Units in Hidden Layer 1 <sup>a</sup>		3
	Activation Function		Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	SOC
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares

a. Excluding the bias unit

Στο Διάγραμμα 15, παρουσιάζεται το δίκτυο που χρησιμοποίησε το στατιστικό πακέτο για την εκτίμηση της οργανικής ουσίας από δύο κύριες συνιστώσες της PCA ανάλυσης. Το διάγραμμα δείχνει τους δύο κόμβους εισόδου, τους 3 κρυφούς κόμβους και τον έναν κόμβο εξόδου που αντιπροσωπεύει την οργανική ύλη του εδάφους.

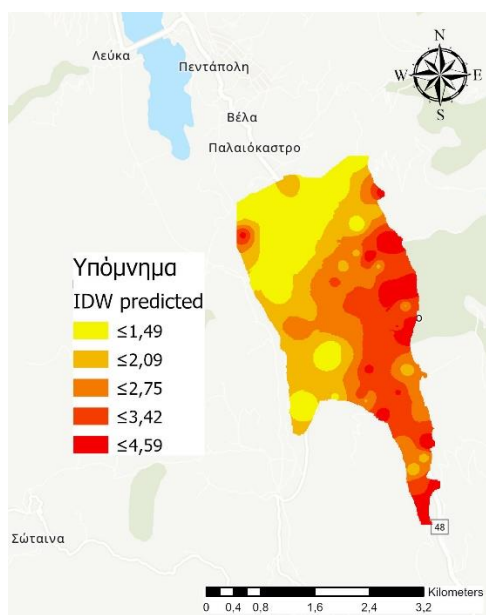


Διάγραμμα 15: Πολυεπίπεδο νευρωνικό δίκτυο

Στην περιοχή του Μαλανδρίνο, ο προβλεπόμενος οργανικός άνθρακας παίρνει τιμές από 1,49 έως 4,59, με τις χαμηλότερες τιμές να κάνουν πιο αισθητή την εμφάνισή τους ιδιαίτερα στο βόρειο και ανατολικό τμήμα. Δυτικά της περιοχής και



σε εντοπισμένες θέσεις βρίσκονται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις του οργανικού άνθρακα.



Χάρτης 15: Προβλεπόμενος οργανικός άνθρακας στην περιοχή του Μαλανδρίνου

Η σύνοψη του μοντέλου (Model Summary), που φαίνεται στον Πίνακα 22, παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης και των δοκιμών. Το σφάλμα αθροίσματος τετραγώνων (Sum of Squares Error (SSE)) δίνεται τόσο για την εκπαίδευση, όσο και για το δείγμα δοκιμών. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του, τόσο πιο καλή είναι και η εκτίμηση του μοντέλου.

Πίνακας 22: Σύνοψη του μοντέλου

Model Summary		
Training	Sum of Squares Error	8,258
	Relative Error	,337
	Stopping Rule Used	1 consecutive step(s) with no decrease in error <sup>a</sup>
	Training Time	0:00:00,02
Testing	Sum of Squares Error	2,841
	Relative Error	,454

Dependent Variable: SOC

a. Error computations are based on the testing sample.

Πράγματι η τιμή του σφάλματος είναι σχετικά μικρή (8,26) και το μοντέλο έχει την ικανότητα να προβλέψει την ποσότητα της οργανικής ουσίας από το έδαφος. Επιβεβαίωση της παραπάνω παρατήρησης αποτελούν τα ποσοστά των λανθασμένων προβλέψεων που βασίζονται στο δείγμα εκπαίδευσης και δοκιμής και είναι 3,4% και

4,5%. Για την επαλήθευση της προσαρμογής του μοντέλου χρησιμοποιούνται οι δείκτες  $R^2$  (Coefficient of Determination), MAE (Mean Absolute Prediction Error) και RMSE (Root Mean Square Error), οι οποίοι υπολογίζονται σύμφωνα με τους τύπους:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \text{average}(b_i))^2}{\sum_{i=1}^n (b_i - \text{average}(b_i))^2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |a_i - b_i|$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}$$

όπου το  $a_i$  και το  $b_i$  οι προβλεπόμενες και παρατηρούμενες τιμές της οργανικής ουσίας και  $n$  το πλήθος του καθενός δείγματος.

Το  $R^2$  είναι το ποσοστό απόκλισης της εξαρτημένης μεταβλητής, το οποίο κυμαίνεται από 0 έως 1, με το 0 να δείχνει ότι το προτεινόμενο μοντέλο δε βελτιώνει την πρόβλεψη έναντι ενός μέσου μοντέλου και το 1 να δηλώνει μία τέλεια πρόβλεψη. Το MAE αντιπροσωπεύει το μέσο όρο της απόλυτης διαφοράς μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης τιμής της μεταβλητής και υπολογίζει το μέσο όρο των σφαλμάτων του δείγματος, ενώ το RMSE είναι η τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης των σφαλμάτων. Οι χαμηλότερες τιμές του υποδεικνύουν την απόλυτη προσαρμογή του μοντέλου στα δεδομένα.

Επομένως, όσο χαμηλότερες είναι οι τιμές των MAE και RMSE (προς το 0), τόσο μεγαλύτερη είναι και η ακρίβεια του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά, μία υψηλή τιμή του  $R^2$  (προς το 1) θεωρείται ικανοποιητική (Chugh, 2020). Έτσι, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα μπορεί οι τιμές των MAE και RMSE να μην είναι τόσο χαμηλές, αλλά επειδή το  $R^2$  τείνει προς τη μονάδα, γίνεται αποδεκτό ότι το μοντέλο προσαρμόζεται καλά στα δεδομένα της υπάρχουσας περιοχής.

**Πίνακας 23: Δείκτες προσαρμογής του μοντέλου**

<b><math>R^2</math></b>	<b>0,69</b>
<b>MAE</b>	<b>0,52</b>
<b>RMSE</b>	<b>0,72</b>

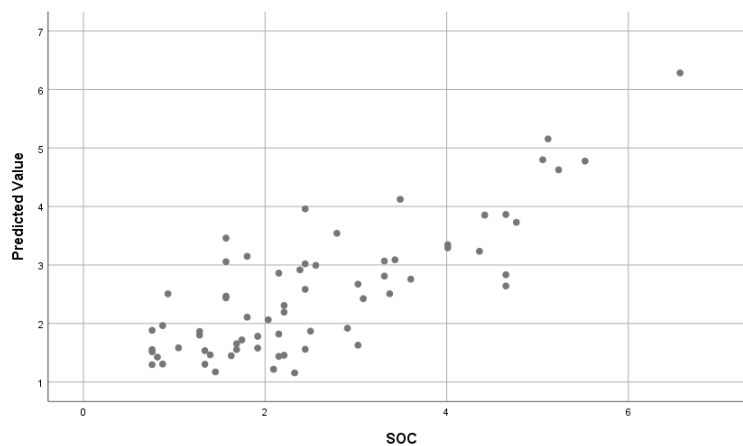
Ο Πίνακας 24 εμφανίζει τα βάρη που έχουν υπολογιστεί από το πρόγραμμα, χρησιμοποιώντας μόνο τα δεδομένα εκπαίδευσης του μοντέλου (training dataset).

**Πίνακας 24: Βάρη**

		Parameter Estimates			Output Layer SOC
		Predicted			
Predictor		Hidden Layer 1 H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	
Input Layer	(Bias)	,550	,406	-,649	

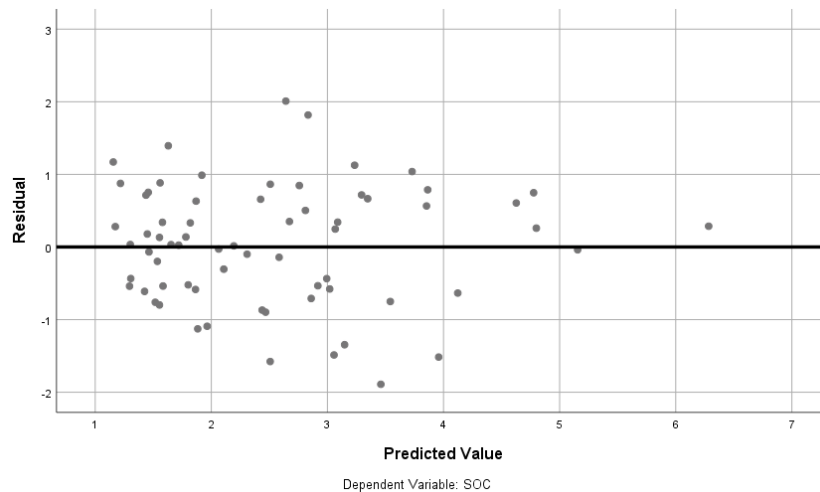
	FAC1_1	,013	-2,131	1,127	
	FAC2_1	-,810	-,221	-,408	
Hidden Layer 1	(Bias)				,073
	H(1:1)				-,633
	H(1:2)				-1,297
	H(1:3)				-,888

Το δίκτυο φαίνεται επίσης να είναι αρκετά καλό στην πρόβλεψη της ποσότητας της οργανικής ουσίας. Σύμφωνα με το Διάγραμμα 16 φαίνεται ότι υπάρχουν τρεις κύριες ομάδες της ύλης αυτής. Στην κάτω αριστερή γωνία βρίσκονται χαμηλές ποσότητες της και αυτό έχει να κάνει είτε με τη διατήρηση πρακτικών μη φιλικών προς το περιβάλλον κι επομένως απελευθέρωση μεγαλύτερης ποσότητας CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, είτε με την ύπαρξη γυμνού εδάφους. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να εισχωρήσει στο έδαφος άνθρακας και να δεσμευθεί. Επομένως, χαμηλή ποσότητα της οργανικής ύλης του εδάφους συνεπάγεται έκλυση αερίων του θερμοκηπίου κι επομένως διόγκωση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Στη δεύτερη ομάδα της ύλης (μεσαία στήλη), η ποσότητα της οργανικής ουσίας κυμαίνεται από 1-4%. Στην κατηγορία αυτή, σημειώνονται οι περισσότερες παρατηρήσεις, γεγονός το οποίο οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η περιοχή τείνει να αποτρέψει τη μεταβολή του κλίματος. Η υιοθέτηση καλύτερων και βιώσιμων γεωργικών πρακτικών θα ήταν ιδανική ώστε να καταγραφούν περισσότερες παρατηρήσεις υψηλότερων συγκεντρώσεων οργανικής ουσίας στο έδαφος, όπως αυτές της τρίτης ομάδας οι οποίες είναι ελάχιστες.



Διάγραμμα 16: Πρόβλεψη της οργανικής ουσίας του εδάφους

Το διάγραμμα *residual-by-predicted-value* είναι ένα διάγραμμα διασποράς του σφάλματος (*residual* = παρατηρούμενη τιμή μείον την προβλεπόμενη τιμή) και της προβλεπόμενης τιμής (*predicted value*).



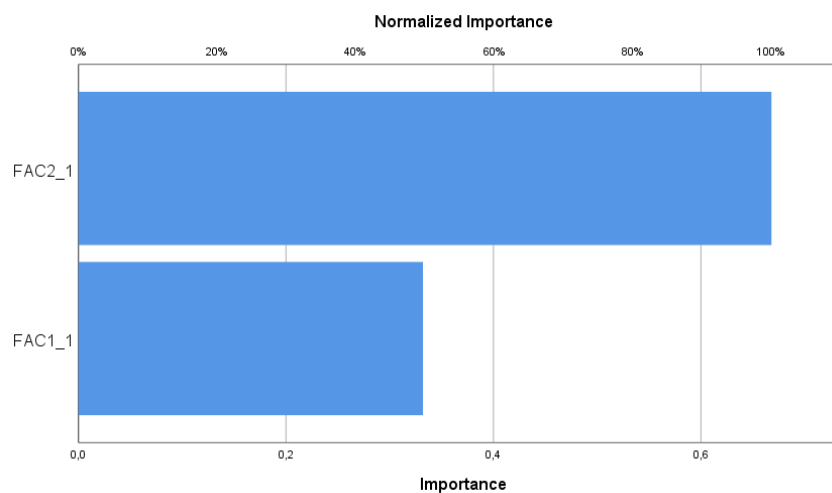
Διάγραμμα 17: Σφάλμα και προβλεπόμενη τιμή

Στον Πίνακα *Independent Variable Importance* δίνεται η επίδραση κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής στο μοντέλο ΤΝΔ ως προς τη σημαντικότητα του θέματος.

Πίνακας 25: Επίδραση των ανεξάρτητων μεταβλητών ως προς τη σημαντικότητα

	Importance	Normalized Importance
factor score 1 for analysis 1	,332	49,7%
factor score 2 for analysis 1	,668	100,0%

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η σημασία των μεταβλητών, δηλαδή πόσο ευαίσθητο είναι το μοντέλο. Από το γράφημα είναι προφανές ότι η πρώτη κύρια συνιστώσα έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη διαμόρφωση της τιμής της οργανικής ουσίας.



Διάγραμμα 18: Σημασία των μεταβλητών

## 5. Συμπεράσματα

Είναι σημαντικό να κατανοηθεί η γονιμότητα των εδαφών, αλλά και ο ρόλος ύπαρξης φυτικής κάλυψης, καθώς μπορεί να αποτελέσουν ασπίδα απέναντι στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, συμβάλλοντας με διάφορους τρόπους στη διαμόρφωση του κλίματος. Το φαινόμενο δε θα εκλυθεί, αλλά θα μετριαστεί σταδιακά, αφού τα επιτρεπτά όρια των αερίων του θερμοκηπίου, που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα και οι συνέπειες των ακραίων φαινομένων, που οφείλονται στην αλλαγή του κλίματος (καύσωνες, ξηρασίες, πυρκαγιές, πλημμύρες κ.ά.) θα περιοριστούν σε τοπικό, αλλά και διεθνές επίπεδο.

Η τεχνολογία έρχεται να πλαισιώσει την έρευνα, έτσι, ώστε σε συνδυασμό να προβλέψουν με ακρίβεια τις μελλοντικές συνθήκες πιθανών προβλημάτων, τέτοιων όπως αυτή του αποθέματος άνθρακα στο έδαφος και της μεταβολής του κλίματος. Πολλοί μελετητές έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους σε διάφορες τεχνικές *βαθιάς μάθησης* (deep learning), που απαιτούν προγραμματιστικό περιβάλλον για να αναπτυχθούν. Έπειτα, η *συνεχής έρευνα* οδηγεί στην εφαρμογή μοντέλων, τα οποία ανταποκρίνονται ικανοποιητικά ανάλογα με το αντικείμενο μελέτης.

Μία πολλά υποσχόμενη και καινοτόμα τεχνολογική μέθοδος, που εφαρμόζεται κατά κόρον, εξαιτίας του εύρους εφαρμογών τους και της μεγάλης επιτυχίας τους σε πολλούς και διαφορετικούς επιστημονικούς τομείς, είναι τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα. Πρόκειται για ένα μοντέλο πρόβλεψης και εκτίμησης, που βασίζεται στον ανθρώπινο εγκέφαλο και πιο συγκεκριμένα στη λειτουργία του νευρωνικού δικτύου. Πολλές έρευνες που αφορούν εδαφολογικά και κλιματικά ζητήματα έχουν εφαρμοστεί σε μέρη που παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα ως προς τη γονιμότητα των εδαφών, την αλατότητα κ.ά., με στόχο να προταθούν πιθανές λύσεις αντιμετώπισής τους μέσω των ΤΝΔ, τα οποία παρουσιάζουν υψηλά ποσοστά ακρίβειας και αξιοπιστίας στην πλειοψηφία των εφαρμογών τους.

Πράγματι, το μοντέλο νευρωνικού δικτύου MLP που εφαρμόστηκε στην περιοχή του Μαλανδρινού φάνηκε να έχει σχετικά καλή προσαρμοστικότητα με βάση τα υπάρχοντα εδαφολογικά και δορυφορικά δεδομένα. Επομένως, είναι δυνατόν να προσαρμοστεί ευρέως σε περιοχές με παρόμοιες εδαφοκλιματικές συνθήκες, όπως αυτήν του Μαλανδρινού, εφόσον υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα και με την προϋπόθεση εφαρμογής κατάλληλων ελέγχων υποθέσεων, ώστε να απορριφθούν οι μεταβλητές που δε θα προσφέρουν αξιόπιστα και αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Ακόμα, λειτουργεί και ως μοντέλο προσδιορισμού και πρόβλεψης του οργανικού άνθρακα του εδάφους, συντελώντας στο μετριασμό της κλιματικής αλλαγής.

Το έλλειμμα της γνώσης για γεωργικά ζητήματα παραμένει μεγάλο. Η πανδημία του ιού Covid-19 είχε άμεσες, παράπλευρες, βραχυχρόνιες και

μακροχρόνιες επιπτώσεις στο σύστημα αγροδιατροφής, τοπικά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Ωστόσο, η πανδημία ενίσχυσε την αντίληψη για το σημαντικό ρόλο της παραγωγής και διανομής τροφίμων στο περιβάλλον, στο κλίμα και στην οικονομική ανάπτυξη και συνέβαλε σημαντικά στη διαμόρφωση της νέας κοινής αγροτικής πολιτικής. Έτσι, όσο καλύτερα κατανοούνται οι δυναμικές που αναπτύσσονται μεταξύ του εδάφους, της γης και του κλίματος, τόσο περισσότερες πιθανότητες υπάρχουν ώστε να σχεδιαστούν και να υλοποιηθούν βιώσιμες λύσεις - πρακτικές. Η κλιματική αλλαγή καθίσταται βασική προτεραιότητα όλης της ανθρωπότητας, εξαιτίας της στενής διασύνδεσής της με τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Οι πολίτες θα πρέπει να συνειδητοποιήσουν τη σοβαρότητα της κατάστασης, αντισταθμίζοντας μέρος των αέριων ρύπων που παράγουν καθημερινά. Η φύτευση δέντρων, για παράδειγμα, στο αστικό περιβάλλον της πόλης θα ήταν ένα καλό ξεκίνημα. Τα δέντρα αυτά μπορεί να είναι μουριές, νεραντζιές, πλατάνια, κουτσουπιές, κουκουναριές, ελιές, ιβίσκοι κλπ, τα οποία μπορεί να φυτευτούν με επιτυχία σ' ένα πυκνοδομημένο περιβάλλον σαν αυτό της πόλης. Το χειμώνα τα φυλλοβόλα δέντρα επιτρέπουν στις θερμές ακτίνες του ηλίου να διαπεράσουν τη γήινη επιφάνεια, διατηρώντας τον πλανήτη στα απαραίτητα θερμοκρασιακά επίπεδα. Τέλος, ο σφένδαμος, ένα δέντρο με ευεργετικές ιδιότητες, δεσμεύει το CO<sub>2</sub>, που απελευθερώνεται στις πόλεις, απορροφώντας τα διάφορα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας και προλαμβάνοντας την πρόκληση καταστροφικών φαινομένων, τέτοια σαν τα πλημμυρικά.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

Βάσκου, Ε. (2015), *Η ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή της Ευρώπης*, Διαθέσιμο από: [ikee.lib.auth.gr/record/269783/files/GRI-2015-14661.pdf](http://ikee.lib.auth.gr/record/269783/files/GRI-2015-14661.pdf) (Πρόσβαση 16/02/2021).

ΕΟΠ (2015), *Κλιματική αλλαγή και γεωργία*, Διαθέσιμο από: <https://www.eea.europa.eu/el/pressroom/grafikes-plirofories/klimatiki-allagi-kai-georgia/view> (Πρόσβαση 20/01/2021).

ΕΟΠ (2019α), *Έδαφος, γη και κλιματική αλλαγή*, Διαθέσιμο από: <https://www.eea.europa.eu/el/simata-eop-2010/simata-2019/arthra/edafos-gi-kai-klimatiki-allagi> (Πρόσβαση 22/01/2021).

ΕΟΠ (2019β), *Έδαφος*, Διαθέσιμο από: <https://www.eea.europa.eu/el/themes/soil> (Πρόσβαση 22/01/2021).

- ΕΟΠ (2019γ), *Η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή είναι το κλειδί για το μέλλον της γεωργίας στην Ευρώπη*, Διαθέσιμο από: <https://www.eea.europa.eu/el/articles/i-prosarmogi-stin-klimatiki-allagi> (Πρόσβαση 22/01/2021).
- ΕΟΠ (2020), *Γεωργία – εισαγωγή*, Διαθέσιμο από: <https://www.eea.europa.eu/el/themes/agriculture> (Πρόσβαση 25/01/2021).
- Ηλιοπούλου, Π. (2015), *Γεωγραφική Ανάλυση*, [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Διαθέσιμο από: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/2059>.
- Καζακλάρη, Χ., Φουρκιώτης, Μ. (2020), *Εφαρμογή Τεχνικών Μηχανικής Μάθησης για την πρόβλεψη συμπεριφοράς πεζών σε σηματοδοτούμενη διασταύρωση, υπό μεταβλητές συνθήκες πληροφόρησης*, Διαθέσιμο από: <https://ikee.lib.auth.gr/record/320586/files/Kazaklari%20Fourkiotis.pdf> (Πρόσβαση 10/02/2021).
- Καλιακάτσου, Γ. (2012), *Η επίδραση των αλλαγών χρήσης γης και των κλιματικών αλλαγών στα εδάφη της λεκάνης απορροής του ποταμού Κοιλιάρη*, Διαθέσιμο από: <http://artemis.library.tuc.gr/DT2013-0037/DT2013-0037.pdf> (Πρόσβαση 10/02/2021).
- Καραγεώργος, Δ. Λ. (2010), *Στατιστική Περιγραφική & Επαγωγική: Μία Διδακτική Προσέγγιση*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Σαββάλας.
- Καραντινίνης, Κ. (2020), *Η Ελληνική Γεωργία Και Αγροδιατροφή Μετά Την Πανδημία*, Διαθέσιμο από: <https://www.dianeosis.org/2020/08/i-elliniki-georgia-kai-agrodiatrosfi-meta-tin-pandimia/> (Πρόσβαση 22/02/2021).
- Κοτρωνάκης, Μ. (2018), *Ο ρόλος της οργανικής ουσίας στη δομή και στην ποιότητα του εδάφους*, Διαθέσιμο από: <https://docplayer.gr/79799518-Didaktoriki-diatrivni-o-rolis-tis-organikis-oysias-sti-domi.html> (Πρόσβαση 10/02/2021).
- Κουκουλάκης Π., Σιμώνης Α., Γκέρτσης Α. (2000), *Η οργανική ουσία του εδάφους. Το πρόβλημα των ελληνικών εδαφών*, Εκδόσεις: Σταμούλη Α.Ε.
- Μπερτζελέτου, Δ. (2016), *Αγροδιατροφή, από την εμπέδωση στην ευθύνη*, Διαθέσιμο από: <https://www.mednutrition.gr/portal/enimerosi/ekdiloseis/14727-agro-diatrosfi-aro-tin-empedosi-stin-efthyni> (Πρόσβαση 10/02/2021).
- Νικολακόπουλος, Κ., Κατσάνου, Κ., Λαμπράκης, Ν. (2015), *Χωρική παρεμβολή*, [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Διαθέσιμο από: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/2527?locale=en>.

- Ντότσικας, Ι. (2007), *Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα*, Διαθέσιμο από: <https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/CHEM234/Artificial%20Neural%20Networks.pdf> (Πρόσβαση 28/02/2021).
- Παράσχος, Α. (2012), *Συστήματα αναφοράς στη Γεωδαισία*, Διαθέσιμο από: [https://www.academia.edu/11136422/\\_ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ\\_ΑΝΑΦΟΡΑΣ\\_ΣΤΗ\\_ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ\\_](https://www.academia.edu/11136422/_ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ_ΑΝΑΦΟΡΑΣ_ΣΤΗ_ΓΕΩΔΑΙΣΙΑ_) (Πρόσβαση 12/02/2021).
- Παρχαρίδης, Ι. (2015), *Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης*, [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Διαθέσιμο από: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/3960>.
- Σαλάτας, Ι. (2011), *Υλοποίηση και εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων για την πρόβλεψη χρονοσειρών συναλλαγματικών ισοτιμιών*, Διαθέσιμο από: <https://docplayer.gr/1670329-Υλοποιisi-kai-efarmogi-tehniton-neyronikon-diktyon-gia-tin-provlepsi-hronoseiron-synallagmatikon-isotimion.html> (Πρόσβαση 12/02/2021).
- Συμεωνάκη, Μ. (2015), *Στατιστική για όλους με το SPSS*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Σοφία.
- Χαλκιάς, Χ. (2007), *Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών II*, [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας.
- Χαλκιάς, Χ. (2011), *Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών*, [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας.
- Χαλκιάς, Χ. (2015), *Γεωγραφική ανάλυση με την αξιοποίηση της Γεωπληροφορικής*, [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Διαθέσιμο από: <http://hdl.handle.net/11419/4546>.
- Χατζηχριστάκης, Φ. (2018), *Εφαρμογές τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη της διάρκειας αδειοδότησης τεχνικών έργων*, Διαθέσιμο από: <https://ikee.lib.auth.gr/record/302788/files/GRI-2019-23568.pdf> (Πρόσβαση 24/02/2021).
- Wright, R. T., Boorse, D. F. (2012), *Περιβαλλοντική επιστήμη προς ένα βιώσιμο μέλλον*, Επιστημονικές εκδόσεις Παρισιανού Α.Ε.

### Ξενόγλωσση

- Alcamo, J., van Vuuren, D., Ringler, C., Cramer, W., Masui, T., Alder, J. and Schulze, K. (2005), *Changes in nature's balance sheet: Model-based estimates of future worldwide ecosystem services*, Ecology and Society.



- Allison, F. E. (1973), *Soil organic matter and its role in crop production*, Soil organic matter and its role in crop production.
- Arias, M. E., González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Ball, A. S. (2005), *Soil health—a new challenge for microbiologists and chemists*, *International Microbiology* 8, 13-21.
- Avery, T. E., Berlin, G. L. (1992), *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation (5th edition)*, New York: Mc Millan Publishing Company.
- Banwart, S. (2011), *Save our soils*, Nature.
- Banwart, S., Menon, M., Bernasconi, S. M., Bloem, J., Blum, W. E. H., Souza, D. M. de, Davidsdotir, B., Duffy, C., Lair, G. J., Kram, P., Lamacova, A., Lundin, L., Nikolaidis, N. P., Novak, M., Panagos, P., Ragnarsdottir, K. V., Reynolds, B., Robinson, D., Rousseva, S., de Ruiten, P., van Gaans, P., Weng, L., White, T. and Zhang, B. (2012), *Soil processes and functions across an international network of Critical Zone Observatories: Introduction to experimental methods and initial results*, *Comptes Rendus - Geoscience*.
- Berge, H. F. M. ten, Schroder, J. J. (2017), Research for AGRI Committee-Preserving agricultural soils in the EU, Διαθέσιμο από: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/601973/IPOL\\_STU\(2017\)601973\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/601973/IPOL_STU(2017)601973_EN.pdf) (Πρόσβαση 12/02/2021).
- Bhunja, G. S., Shit, P. K., Pourghasemi, H. R. (2017), *Soil organic carbon mapping using remote sensing techniques and multivariate regression model*, Geocarto International.
- Blum, W. E. H. (2005), *Functions of soil for society and the environment*, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 4, 75–79.
- Brady, N. C. (2002), *The Nature and Properties of Soils*, New Jersey, USA, Prentice Hall.
- Brantley, S. L., White, T. S., White, A. F., Sparks, D., Richter, D., Pregitzer, K., Derry, L., Chorover, J., Chadwick, O., April, R., Anderson, S., Amundson, R. (2006), *Frontiers in exploration of the Critical Zone: Report of a workshop sponsored by the National Science Foundation (NSF)*, Newark, DE, 30p.
- Chapin, F. S., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Stuart Chapin F., Iii., Matson, P. A., Vitousek, P. M. (2012), *Principles of terrestrial ecosystem ecology*, *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*.

- Chugh, A. (2020), *MAE, MSE, RMSE, Coefficient of Determination, Adjusted R Squared – Which Metric is Better?*, Διαθέσιμο από: <https://medium.com/analytics-vidhya/mae-mse-rmse-coefficient-of-determination-adjusted-r-squared-which-metric-is-better-cd0326a5697e> (Πρόσβαση 27/02/2021).
- Clima Central, *Surging Seas Mapping Choice*, Διαθέσιμο από: <https://choices.climatecentral.org/#12/40.7117/-74.0008?compare=temperatures&carbon-end-yr=2100&scenario-a=warming-4&scenario-b=warming-2> (Πρόσβαση 01/02/2021).
- Commission of the European Communities (2006), *Thematic strategy for soil protection*, Com (2006).
- Copernicus (2021), *Land monitoring service*, Διαθέσιμο από: <https://land.copernicus.eu/> (Πρόσβαση 15/02/2021).
- Critical Zone Observatories (2012), *The Critical Zone is Earth's outer skin*, Διαθέσιμο από: <https://czo-archive.criticalzone.org/national/research/the-critical-zone-1national/> (Πρόσβαση 14/02/2021).
- Diacono, M., Montemurro, F. (2010), *Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review*, *Agronomy for Sustainable Development*, 30(2), 401–422.
- Eagle, A., Henry, L., Olander, L., Kozyra, K., Millar, N., Robertson, G. (2011), *Greenhouse gas mitigation potential of agricultural land management in the United States: A synthesis of the literature*, Δεύτερη Έκδοση, Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions.
- Elliott, E. (1986), *Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils*, *Soil Science Society of America Journal*, 50(S-3), pp. 627–633.
- ESRI (2017), *Human activities are reshaping Earth's surface*, Διαθέσιμο από: <http://storymaps.esri.com/stories/LandsatCompare/> (Πρόσβαση 02/02/2021).
- ESRI, (2020), *How inverse distance weighted interpolation works*, Διαθέσιμο από: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm> (Πρόσβαση 15/02/2021).
- European Commission (2012), *Report on the implementation of the Soil Thematic Strategy and ongoing activities*, Διαθέσιμο από: [https://ec.europa.eu/environment/soil/three\\_en.htm](https://ec.europa.eu/environment/soil/three_en.htm) (Πρόσβαση 17/02/2021).

- European Commission (2015), *Paris Agreement*, Διαθέσιμο από: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en) (Πρόσβαση 17/02/2021).
- European Commission (2018), *Land use and forestry regulation for 2021-2030*, Διαθέσιμο από: [https://ec.europa.eu/clima/policies/forests/lulucf\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/forests/lulucf_en) (Πρόσβαση 17/02/2021).
- Eurostat (2021), *Greenhouse gas emissions by source sector*, Διαθέσιμο από: [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?lang=en&dataset=env\\_air\\_gge](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?lang=en&dataset=env_air_gge) (Πρόσβαση 14/01/2021).
- EEA (2017), *Distribution of Utilised Agricultural Area (UAA) by category*, Διαθέσιμο από: [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/distribution-of-utilised-agricultural-area#tab-chart\\_1](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/distribution-of-utilised-agricultural-area#tab-chart_1) (Πρόσβαση 20/01/2021).
- Fagnano, M., Adamo, P., Zampella, M., Fiorentino, N. (2011), *Environmental and agronomic impact of fertilization with composted organic fraction from municipal solid waste: A case study in the region of Naples, Italy*, Agriculture, Ecosystems and Environment.
- FAO (2017), *Global soil organic carbon map*, Διαθέσιμο από: <http://www.fao.org/3/i8195e/i8195e.pdf> (Πρόσβαση 25/01/2021).
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D. P. M. (2011), *Solutions for a cultivated planet*, Nature.
- Franco - Otero, V. G., Soler - Rovira, P., Hernández, D., López – de - Sá, E. G. and Plaza, C. (2012), *Short - term effects of organic municipal wastes on wheat yield, microbial biomass, microbial activity, and chemical properties of soil*, Biology and Fertility of Soils.
- Google Earth Engine, *A planetary – scale platform for Earth science data & analysis*, Διαθέσιμο από: <https://earthengine.google.com/> (Πρόσβαση 21/01/2021).
- Jamalabad M, Abkar A. (2004), *Forest canopy density monitoring, using satellite images*. In: XXth ISPRS Congress. Istanbul; International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS). p. 12–23.
- Jolliffe I.T. (1990), *Principal Component Analysis: A Beginner's Guide- I*, Introduction and application, Weather, 45, 375–382.

- Kumar P, Pandey PC, Singh BK, Katiyar S, Mandal VP, Rani M, Tomar V, Patairiya S. (2016), *Estimation of accumulated soil organic carbon stock in tropical forest using geospatial strategy*, Egyptian J Remote Sens Space Sci19:109–123.
- Lal, R. (2004), *Soil carbon sequestration to mitigate climate change*, Geoderma 123, 1–22.
- Lal, R., Follett, R. F., Stewart, B. A. and Kimble, J. M. (2007), *Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security*, Soil science.
- Life ClimaTree, *The project*, Διαθέσιμο από: <https://www.lifeclimatree.eu/english/the-project/> (Πρόσβαση 20/02/2021).
- Michalopoulos (2011), *Life cycle assessment of extra virgin olive oil produced by three groups of farmers in south Greece*, Διαθέσιμο από: [https://www.researchgate.net/publication/258285297\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_of\\_olive\\_oil\\_production\\_in\\_France](https://www.researchgate.net/publication/258285297_Life_Cycle_Assessment_of_olive_oil_production_in_France) (Πρόσβαση 21/02/2021).
- Mills, J., Birli, B., Morari, F. (2018), *Έρευνα πεδίου: ανακαλύπτοντας τη δομή του εδάφους*, Διαθέσιμο από: <https://www.scienceinschool.org/el/content/έρευνα-πεδίου-ανακαλύπτοντας-τη-δομή-του-εδάφους> (Πρόσβαση 25/02/2021).
- Montanarella, L. and Panagos, P. (2015), *Policy relevance of Critical Zone Science*, Land Use Policy.
- Murphy, D. V., Stockdale, E. A., Poulton, P. R., Willison, T. W. and Goulding, K. W. T. (2007), *Seasonal dynamics of carbon and nitrogen pools and fluxes under continuous arable and ley-arable rotations in a temperate environment*, European Journal of Soil Science.
- NASA, *Climate Time Machine*, Διαθέσιμο από: <https://climate.nasa.gov/interactives/climate-time-machine/> (Πρόσβαση 21/02/2021).
- Nikolaidis, N. P. (2011), *Human impacts on soils: Tipping points and knowledge gaps*, Applied Geochemistry.
- Papadimitriou C.A., Samaras P., Zaboulis A.I., Petridis D. and Sakelaropoulos G.P. (2011), *Effects of influent composition on activated sludge protozoa*, Desalination and Water Treatment, 33, p. 132-139.
- Plapp, T. (2001), *Perception and Evaluation of Natural Risks*, Διαθέσιμο από: <http://www.docstoc.com/docs/142383785/Perception-and-Evaluation-of-Natural-Risks> (Πρόσβαση 15/01/2021).

- Raphaelides S.N., Ambatzidou A., Petridis D. (1996), *Sugar composition effects on textural parameters of peach jams*, *Journal of Food Science*, 61, p. 942-946.
- Rencher A.C., Christensen W.F. (2012), *Methods of Multivariate Analysis*, 3rd ed. John Wiley & Sons., N. Jersey, p. 758.
- Satellite Imaging Corporation (2017), *Sentinel-2A (10m) Satellite Sensor*, Διαθέσιμο από: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/sentinel-2a/> (Πρόσβαση 27/02/2021).
- Shabou M, Mougnot B, Chabaane ZL, Walter C, Boulet G, Aissa NB, Zribi M. (2015), *Soil clay content mapping using a time series of landsat TM data in semi-arid lands*, *Remote Sens.* 7(5):6059–6078.
- Sharma S. (1996), *Applied multivariate techniques*, John Wiley and Sons, N. York, p. 493.
- Soufleros E.H., Pissa I., Petridis D., Lygerakis M., Mermelas K., Boukouvalas G. and Tsimitakis E. (2001), *Instrumental analysis of volatile and other compounds of greek kiwi wine: sensory evaluation and optimisation of its components*, *Food Chemistry*, 75, p. 487-500.
- The European Space Agency (2021), *Sentinel-2 operations*, Διαθέσιμο από: [http://www.esa.int/Enabling\\_Support/Operations/Sentinel-2\\_operations](http://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinel-2_operations) (Πρόσβαση 03/03/2021).
- Vleeshouwers, L. M., Verhagen, A. (2002), *Carbon emission and sequestration by agricultural land use: a model study for Europe*, Διαθέσιμο από: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1046/j.1365-2486.2002.00485.x> (Πρόσβαση 16/02/2021).
- Wang, P., Ma, Q., Wang, J., Hong, W., Li, Y. and Chen, Z. (2013), *An improved sar radiometric terrain correction method and its application in polarimetric sar terrain effect reduction*, *Progress In Electromagnetics Research B*. EMW Publishing, 54, pp. 107–128.
- Waring, R. H. and Running, S. W. (1998), *Forest ecosystems: analysis at multiple scales*, in *Forest ecosystems: analysis at multiple scales*.
- Zacharis, N. Z. (2016), *Predicting student academic performance in blended learning using artificial neural networks*, Διαθέσιμο από: <https://www.aircconline.com/ijaia/V7N5/7516ijaia02.pdf> (Πρόσβαση 24/02/2021).