



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΤΟΥ ΔΑΣΙΚΟΥ  
ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ELTER ZÖBELBODEN ΣΤΗΝ  
ΑΥΣΤΡΙΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΗΣ  
ΚΟΥΚΙΑΝΑΚΗ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑΣ**

*ΧΑΝΙΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ, 2022*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

Εργαστήριο υδρογεωχημικής μηχανικής και αποκατάστασης εδαφών

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΤΟΥ ΔΑΣΙΚΟΥ  
ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ELTER ZÖBELBODEN ΣΤΗΝ  
ΑΥΣΤΡΙΑ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΤΗΣ  
ΚΟΥΚΙΑΝΑΚΗ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑΣ

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Νικολαΐδης Νικόλαος (Επιβλέπων)

Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Λιλλή Μαρία

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην μελέτη του εδάφους, της δομής, των λειτουργιών και των αλληλεπιδράσεών του εντός της κρίσιμης ζώνης της Γης. Το έδαφος όντας οικοσύστημα, προσφέρει πλήθος υπηρεσιών όπως η μεταφορά νερού και θρεπτικών συστατικών, η αποθήκευση οργανικής ύλης, η παραγωγή βιομάζας και τροφίμων, η διατήρηση της βιοποικιλότητας κ.α. Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί εργαλείο ανάλυσης, μοντελοποίησης και προσομοίωσης των εδαφικών λειτουργιών του δασικού οικοσυστήματος Zöbelboden σε επίπεδο είδους δέντρου (*Picea abies*).

Κύριος σκοπός της εργασίας είναι η εύρεση παραγόντων που επηρεάζουν την Ακαθάριστη Πρωτογενή Παραγωγή (GPP, Gross Primary Production). Ο σκοπός επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας το μονοδιάστατο μοντέλο ολοκληρωμένης κρίσιμης ζώνης (1D-ICZ, Integrated Critical Zone) το οποίο απαρτίζεται από 4 υπομοντέλα (HYDRUS-1D, CAST, PROSUM, SAFE). Καθένα από τα υπομοντέλα αυτά αρχικοποιήθηκαν και βαθμονομήθηκαν για τα χρονικά διαστήματα 2015-2019 και 1996-2020 χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες μετρήσεις του σταθμού eLTER Zöbelboden στην Αυστρία. Το μοντέλο προσομοίωσε επιτυχώς την παραγωγή της βιομάζας του είδους δέντρου *Picea abies*, την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών (C, N, K, P, Mg, Ca), τη δέσμευση άνθρακα σε όλη τη μάζα του εδάφους αλλά και στα κλάσματα συσσωματωμάτων, την μάζα των συσσωματωμάτων που είναι σταθερά στη διαβροχή (WSA, Water Stable Aggregates) και τέλος, τις διαλυτές ουσίες  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  και  $\text{SO}_4^{2-}$ . Επίσης, μέσω του υπολογισμού του δείκτη ξηρασίας RDI (Reconnaissance Drought Index) προσδιορίστηκαν τα φαινόμενα ξηρασίας που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια της 25ετίας (1996-2020) και διερευνήθηκε η επίδραση 1) της ξηρασίας στην GPP (απόκριση), 2) της ξηρασίας στην ανθεκτικότητα της GPP και 3) της αλλαγής της εδαφικής δομής (μέσω της προσθήκης κόμποστ) στην GPP.

Η μελέτη οδήγησε στο συμπέρασμα πως η ξηρασία συσχετίζεται άμεσα με την GPP. Δηλαδή, όσο αυξάνεται η ένταση της ξηρασίας τόσο αυξάνεται η ανταπόκριση και η ανθεκτικότητα της GPP σ' αυτή. Η προσθήκη εδαφοβελτιωτικού αύξησε απειροελάχιστα την ακαθάριστη πρωτογενή παραγωγή (GPP) και τη χρήση αποδοτικότητας νερού (WUE, Water Use Efficiency) ενώ δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στην εδαφική υγρασία (soil moisture). Αντιθέτως, παρατηρήθηκε αύξηση του δεσμευμένου οργανικού άνθρακα και των υδατοσταθερών μακρο-συσσωματωμάτων (AC3).

## Abstract

In recent years, a lot of emphasis has been given to soil, its structure, functions and interactions within the Earth's critical zone. Soil is an ecosystem that offers plenty of services such as water and nutrient transport, organic matter storage, biomass and food production, maintenance of biodiversity etc. The present thesis is a tool for analysis, modelling and simulation of the Zöbelboden forest ecosystem soil functions at the level of tree type (*Picea abies*).

The thesis mainly aims to specify the factors that affect Gross Primary Production (GPP). The aim is achieved by using the one-dimensional Integrated Critical Zone Model (1D-ICZ) that consists of 4 sub-models (HYDRUS-1D, CAST, PROSUM, SAFE). Each sub-model has been set up and calibrated for the periods of time 2015-2019 and 1996-2020 by using the available data of the station eLTER Zöbelboden, Austria. The model has successfully simulated the biomass production of *Picea abies*, the nutrients uptake (C, N, K, P, Mg, Ca), the carbon fixation at the soil and the fractions of aggregates, the mass of water stable aggregates (WSA) and lastly, the solutes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ . Throughout the calculation of the Reconnaissance Drought Index (RDI) it was easy to define the drought phenomena that occurred during the 25year period (1996-2020) and also, to determine 1) the effect of drought to GPP (response), 2) the effect of drought to GPP's resilience and 3) the effect of the change of soil structure (via compost addition) to GPP.

The conclusion that emerged from this study is that drought is directly linked to GPP. More specifically, as the severity of drought increases so does the GPP's response and so does the GPP's resilience. The compost addition has infinitesimally increased the Gross Primary Production (GPP) and Water Use Efficiency (WUE), while no changes in soil moisture were noticed. On the contrary, due to compost addition the fixated organic carbon and the water stable macro-aggregates (AC3) have been increased.

## Πρόλογος και ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με τίτλο «Μοντελοποίηση των λειτουργιών του δασικού οικοσυστήματος του σταθμού eLTER Zöbelboden στην Αυστρία», εκπονήθηκε στα πλαίσια του αναπτυξιακού, ερευνητικού έργου με τίτλο «eLTER – European Long–Term Ecosystem and socio–ecological Research Infrastructure».

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς τον κ. Νικολαΐδη Νικόλαο, τον επιβλέποντα καθηγητή μου και διευθυντή του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών (HERS LAB) της σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η πληθώρα γνώσεων του, οι εποικοδομητικές συμβουλές του, η συνεχής καθοδήγηση, η υποστήριξη και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της άριστης συνεργασίας μας ήταν ζωτικής σημασίας για την ολοκλήρωση της διατριβής.

Τις ευχαριστίες μου εκφράζω στον καθηγητή κ. Παρανυχιανάκη Νικόλαο και στην ερευνήτρια Λιλλή Μαρία, όντας μέλη της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης της πτυχιακής εργασίας μου.

Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την μεταδιδακτορική ερευνήτρια Λιλλή Μαρία, επιστημονική συνεργάτη του εργαστηρίου Υδρογεωχημικής Μηχανικής και Αποκατάστασης Εδαφών (HERS LAB) για την πολύτιμη βοήθειά της και την καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της υποδειγματικής συνεργασίας μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη βοήθεια, την συμπαράσταση, την υποστήριξη και την αγάπη τους.

Κουκιανάκη Ευαγγελία

1 Σεπτεμβρίου 2022, Χανιά

Αφιερώνεται στους γονείς μου, στην αδερφή μου και στην μνήμη του παππού μου...

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	4
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>16</b>
Σκοπός και αντικείμενο εργασίας .....	16
1.1. Έδαφος .....	17
1.1.1. Χαρακτηριστικά και λειτουργίες .....	17
1.1.2. Υφή και δομή .....	19
1.1.3. Η κρίσιμη ζώνη της Γης .....	21
1.1.4. Υποβάθμιση .....	22
1.1.5. Ξηρασία .....	23
i) Palmer Drought Severity Index (PDSI) .....	28
ii) Reconnaissance Drought Index (RDI) .....	28
iii) Standardized Precipitation Index (SPI) .....	29
iv) Surface Water Supply Index (SWSI) .....	30
v) Crop Moisture Index (CMI) .....	31
1.2. Ροές χημικών ουσιών στα οικοσυστήματα .....	31
1.2.1. Κυκλοφορία νερού σ' ένα οικοσύστημα .....	31
1.2.2. Κυκλοφορία άνθρακα σ' ένα οικοσύστημα .....	32
1.2.3. Κυκλοφορία αζώτου σ' ένα οικοσύστημα .....	34
1.2.4. Κυκλοφορία φωσφόρου σ' ένα οικοσύστημα .....	36
1.2.5. Κυκλοφορία θείου σ' ένα οικοσύστημα .....	37
1.3. Διαδικασίες εδαφών .....	38
1.3.1. Συσσωμάτωση .....	38
i) Υδατοσταθερά συσσωματώματα .....	40
ii) Μηχανισμοί συσσωμάτωσης .....	41
1.3.2. Μεταφορά νερού και θρεπτικών συστατικών στα φυτά .....	42
i) Μηχανισμοί μεταφοράς .....	43
ii) Παράγοντες απορρόφησης .....	44
iii) Αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) .....	45
1.4. Μοντελοποίηση .....	47
1.4.1. Κατηγορίες μοντέλων .....	47
1.4.2. Προσομοίωση .....	48
1.4.3. Μοντέλα διεργασιών εδάφους .....	50
i) Μοντέλα RothC-26.3 και STRUC-C .....	50
ii) AggModel και CAST .....	51
iii) Μοντέλο 1D-ICZ .....	54



iv) Μοντέλα HYDRUS-1D και SAFE.....	55
v) Μοντέλο PROSUM .....	56
<b>2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....</b>	<b>58</b>
2.1. Περιγραφή περιοχής μελέτης .....	58
2.1.1. Μετεωρολογικές συνθήκες, ορυκτολογική σύσταση και βλάστηση ευρύτερης περιοχής .....	59
2.1.2. Μετρήσεις σταθμού eLTER Zöbelboden .....	63
2.2. Αρχικοποίηση μοντέλου 1D-ICZ.....	68
2.2.1. Αρχικοποίηση μοντέλου HYDRUS-1D για 60 μήνες.....	68
Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής κατά Penman–Monteith .....	70
2.2.2. Αρχικοποίηση μοντέλου CAST για 60 μήνες.....	75
2.2.3. Αρχικοποίηση μοντέλου PROSUM για 60 μήνες.....	76
2.2.4. Βαθμονόμηση 1D-ICZ για 60 μήνες .....	77
2.3. Αρχικοποίηση μοντέλου 1D-ICZ για 300 μήνες .....	78
2.3.1. Αρχικοποίηση μοντέλου HYDRUS-1D για 300 μήνες.....	79
2.3.2. Αρχικοποίηση μοντέλου CAST για 300 μήνες.....	80
2.3.3. Αρχικοποίηση μοντέλου PROSUM για 300 μήνες.....	81
2.3.4. Βαθμονόμηση 1D-ICZ για 300 μήνες .....	82
2.4. Ανάλυση GPP .....	82
2.4.1. Μελέτη επίδρασης ξηρασίας στην GPP .....	82
2.4.2. Μελέτη επίδρασης ξηρασίας στην ανθεκτικότητα της GPP.....	84
2.4.3. Μελέτη επίδρασης αλλαγής της δομής του εδάφους στην GPP .....	84
<b>3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>86</b>
3.1. Μοντέλο 1D-ICZ 60 μηνών .....	86
3.1.1. Φυτική Ανάπτυξη.....	86
3.1.2. Οργανικός άνθρακας (OC) εδάφους, κλασμάτων συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3) και υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA).....	89
3.1.3. Διαλυτές ουσίες εδαφικού διαλύματος.....	94
3.1.4. WUE .....	97
3.2. Μοντέλο 1D-ICZ 600 μηνών .....	97
3.2.1. Φυτική Ανάπτυξη.....	97
3.2.2. Οργανικός άνθρακας (OC) εδάφους, κλασμάτων συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3) και υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA).....	101
3.2.3. WUE .....	105
3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την GPP.....	105
3.3.1. GPP και ξηρασία .....	105
3.3.2. Ανθεκτικότητα GPP και ξηρασία.....	106
3.3.3. GPP και αλλαγή δομής εδάφους .....	107

i) Οργανικός άνθρακας (OC) εδάφους, κλασμάτων συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3) και υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA) .....	107
ii) Ακαθάριστη Πρωτογενής Παραγωγή (GPP) .....	111
iii) Αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) .....	112
iv) Εδαφική υγρασία (Soil Moisture).....	113
<b>4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>114</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>116</b>
A. Ξενόγλωσση .....	116
B. Ελληνική.....	119
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....</b>	<b>120</b>
Παράρτημα I: Εγχειρίδιο (Manual) στησίματος μοντέλων HYDRUS-1D, CAST, PROSUM, SAFE Weathering και 1D-ICZ για 60 μήνες.....	120
Παράρτημα II: Πίνακες δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τις αρχικοποιήσεις των μοντέλων HYDRUS-1D και PROSUM (60 μηνών, 300 μηνών).....	143
Παράρτημα III: Εγχειρίδιο χρήσης λογισμικού DrinC για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας RDI .....	158
Παράρτημα IV: Πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της συμπεριφοράς της GPP σε φαινόμενα ξηρασίας .....	165

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1. Κλάσματα μηχανικής σύστασης εδαφών [Βαβίζος, Μερτζάνης, 2003] .....	20
Πίνακας 1.2. Δείκτες ξηρασίας [Τσακίρης, 2013] .....	26
Πίνακας 1.3. Κατάταξη ξηρασίας βάσει δείκτη PDSI [Ding et al., 2009] .....	28
Πίνακας 1.4. Κατάταξη ξηρασίας βάσει δείκτη RDI [Τσακίρης, 2013] .....	29
Πίνακας 1.5. Κατάταξη ξηρασίας βάσει δείκτη SPI [Τσακίρης, 2013] .....	30
Πίνακας 1.6. Κατάταξη ξηρασίας βάσει δείκτη SWSI [Wambua et al., 2017] .....	30
Πίνακας 1.7. Βασικά συστατικά NPP [Chapin et al., 2011] .....	33
Πίνακας 2.1. Αρχικές συγκεντρώσεις εδαφικού διαλύματος .....	70
Πίνακας 2.2. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα ( $tC\ ha^{-1}$ ) στον τύπο συσσωματωμάτων AC1 .....	75
Πίνακας 2.3. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα ( $tC\ ha^{-1}$ ) στον τύπο συσσωματωμάτων AC2 .....	75
Πίνακας 2.4. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα ( $tC\ ha^{-1}$ ) στον τύπο συσσωματωμάτων AC3 .....	76
Πίνακας 2.5. Κατανομή σωματιδίων μεγέθους ιλύος-αργίλου και μεγέθους άμμου στα AC1, AC2, AC3 .....	76
Πίνακας 2.6. Βασικές παράμετροι αρχικοποίησης CAST .....	76
Πίνακας 2.7. Ευαίσθητες παράμετροι βαθμονόμησης .....	78
Πίνακας 2.8. Αρχικές συγκεντρώσεις διαλύματος στο έδαφος .....	79
Πίνακας 2.9. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα ( $tC\ ha^{-1}$ ) στον τύπο συσσωματωμάτων AC1 .....	80
Πίνακας 2.10. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα ( $tC\ ha^{-1}$ ) στον τύπο συσσωματωμάτων AC2 .....	80
Πίνακας 2.11. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα ( $tC\ ha^{-1}$ ) στον τύπο συσσωματωμάτων AC3 .....	80
Πίνακας 2.12. Κατανομή σωματιδίων μεγέθους ιλύος-αργίλου και μεγέθους άμμου στα AC1, AC2, AC3 .....	81
Πίνακας 2.13. Βασικές παράμετροι αρχικοποίησης CAST .....	81
Πίνακας 2.14. Ποσότητα C που προστίθεται ( $tC\ ha^{-1}$ ) .....	85
Πίνακας 3.1. Αρχική και τελική υγρασία εδάφους με και χωρίς προσθήκη κόμποστ .....	113
Πίνακας Π2.1. Οριακές συνθήκες θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής 60 μηνών (HYDRUS-1D) .....	143
Πίνακας Π2.2. Οριακές συνθήκες θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής 300 μηνών (HYDRUS-1D) .....	144
Πίνακας Π2.3. Μέση θερμοκρασία και φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία 60 μηνών (PROSUM) .....	150
Πίνακας Π2.4. Μέση θερμοκρασία και φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία 300 μηνών (PROSUM) .....	151
Πίνακας Π4.1. Υπολογιζόμενος δείκτης ξηρασίας Standardized RDI .....	165
Πίνακας Π4.2. Μεγέθη μελέτης επίδρασης ξηρασίας στην GPP .....	170
Πίνακας Π4.3. Μεγέθη μελέτης επίδρασης ξηρασίας στην ανθεκτικότητα .....	172

## Κατάλογος εικόνων

Σχήμα 1.1. Εδαφικές Λειτουργίες [Banwart et al., 2019].....	19
Σχήμα 1.2. Τρίγωνο Μηχανικής Σύστασης Εδαφών [Ζιώβα, 2012] .....	20
Σχήμα 1.3. Η κρίσιμη ζώνη της Γης [Lin, 2010] .....	21
Σχήμα 1.4. Σύνδεση μεταξύ παιδόσφαιρας, βιόσφαιρας, λιθόσφαιρας, υδρόσφαιρας και ατμόσφαιρας της Γης [Li et al., 2012] .....	22
Σχήμα 1.5. Κατηγορίες ξηρασίας [National Drought Mitigation Center, <a href="https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx">https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx</a> ].....	25
Σχήμα 1.6. Ο κύκλος του νερού [ <a href="https://www.britannica.com/science/water-cycle">https://www.britannica.com/science/water-cycle</a> ] .....	32
Σχήμα 1.7. Ροές άνθρακα [Xiao et al., 2019].....	34
Σχήμα 1.8. Ροές αζώτου [Breida et al., 2019].....	36
Σχήμα 1.9. Συνδυασμένος κύκλος C-N-P [ <a href="https://www.eea.europa.eu/el/simata-eop-2010/simata-2019/grafikes-plirofories/o-kyklos-ton-threptikon-stoicheion/view">https://www.eea.europa.eu/el/simata-eop-2010/simata-2019/grafikes-plirofories/o-kyklos-ton-threptikon-stoicheion/view</a> ].....	37
Σχήμα 1.10. Ροές θείου [ <a href="https://www.sciencefacts.net/sulfur-cycle.html">https://www.sciencefacts.net/sulfur-cycle.html</a> ].....	38
Σχήμα 1.11. Εδαφικά συσσωματώματα [Wilpiseski et al., 2019] .....	40
Σχήμα 1.12. Μοντέλο Συσσωμάτωσης [Stamati et al., 2013] .....	42
Σχήμα 1.13. Μηχανισμοί μεταφοράς θρεπτικών συστατικών στις ρίζες των φυτών [Brundrett et al., 2010] .....	44
Σχήμα 1.14. WUE συναρτήσει βιομάζας και εξατμισοδιαπνοής (γενικευμένη σχέση) [Hatfield, Dold, 2019] .....	45
Σχήμα 1.15. Επίπεδα μέτρησης WUE [Medrano et al., 2015].....	46
Σχήμα 1.16. Ταξινόμηση μοντέλων [Λουκής, 2010].....	48
Σχήμα 1.17. Στάδια προσομοίωσης [Λουκής, 2010].....	49
Σχήμα 1.18. Δομή μοντέλου RothC-26.3 [Coleman, Jenkinson, 2014] .....	51
Σχήμα 1.19. AggModel [Segoli et al., 2013] .....	52
Σχήμα 1.20. Αναπαράσταση εργασιών οργανικού άνθρακα και συσσωματωμάτων στο μοντέλο CAST [Stamati et al., 2013] .....	53
Σχήμα 1.21. Υπομοντέλα του 1D-ICZ.....	54
Σχήμα 1.22. Αναπαράσταση τροποποιημένης έκδοσης CAST για χρήση απ' το μοντέλο 1D-ICZ [Nikolaidis et al., 2014] .....	55
Σχήμα 2.1. Σταθμός LTER Zöbelboden [Hartmann et al., 2016].....	58
Σχήμα 2.2. <i>Fagus sylvatica</i> L. [ <a href="https://www.agriamanitaria.gr/fagus-sylvatica-%CE%B4%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%BF%CE%BE%CE%B9%CE%AC/">https://www.agriamanitaria.gr/fagus-sylvatica-%CE%B4%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%BF%CE%BE%CE%B9%CE%AC/</a> ] .....	60
Σχήμα 2.3. <i>Picea abies</i> L. Karst [Bissanti, 2018].....	61
Σχήμα 2.4. <i>Acer pseudoplatanus</i> [ <a href="https://www.i-flora.com/en/the-smartphone-apps/iflora-baeume/species/art/show/acer-pseudoplatanus-1.html">https://www.i-flora.com/en/the-smartphone-apps/iflora-baeume/species/art/show/acer-pseudoplatanus-1.html</a> ].....	61
Σχήμα 2.5. <i>Fraxinus excelsior</i> [ <a href="https://www.i-flora.com/en/image-search/phylogenetic-tree/art/showgallery/fraxinus-excelior.html">https://www.i-flora.com/en/image-search/phylogenetic-tree/art/showgallery/fraxinus-excelior.html</a> ] .....	62
Σχήμα 2.6. <i>Larix decidua</i> Mill. [ <a href="https://www.agriamanitaria.gr/larix-decidua-%CE%BB%CE%AC%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%B1%CF%82-%CE%BF-%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BD%CF%8C%CF%82-2/">https://www.agriamanitaria.gr/larix-decidua-%CE%BB%CE%AC%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%B1%CF%82-%CE%BF-%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BD%CF%8C%CF%82-2/</a> ].....	62
Σχήμα 2.7. <i>Abies alba</i> Mill. [ <a href="https://www.agriamanitaria.gr/abies-alba-%CE%BB%CE%B5%CF%85%CE%BA%CE%AE-%CE%B5%CE%BB%CE%AC%CF%84%CE%B7/">https://www.agriamanitaria.gr/abies-alba-%CE%BB%CE%B5%CF%85%CE%BA%CE%AE-%CE%B5%CE%BB%CE%AC%CF%84%CE%B7/</a> ] .....	63
Σχήμα 2.8. Περιοχές δειγματοληψίας – μετρήσεων Zöbelboden [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)] .....	66
Σχήμα 2.9. α) Δειγματολήπτης litterfall, β) Παρακολούθηση βλάστησης [Proell, Dirnboeck, 2022 (2), Proell, Dirnboeck, 2022 (1)] .....	66

Σχήμα 2.10. Υδατοφράκτης με σταθμό μέτρησης απορροής [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)] .....	67
Σχήμα 2.11. Πύργος Eddy covariance [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)].....	67
Σχήμα 2.12. Εδαφικό προφίλ με 5 κόμβους και 4 στρώματα .....	69

## Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1. Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία και Βροχόπτωση Zöbelboden [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)] .....	59
Διάγραμμα 2.2. Οριακές συνθήκες θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής .....	69
Διάγραμμα 2.3. Ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία (°C) .....	73
Διάγραμμα 2.4. Μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου ( $\text{m s}^{-1}$ ) .....	74
Διάγραμμα 2.5. Ημερήσια ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) .....	74
Διάγραμμα 2.6. PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) και μέση θερμοκρασία (°C) .....	77
Διάγραμμα 2.7. Οριακές συνθήκες μηνιαίας θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής .....	79
Διάγραμμα 2.8. Μέση θερμοκρασία (°C) και PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) .....	81
Διάγραμμα 2.9. Standardized RDI .....	83
Διάγραμμα 2.10. Διακύμανση της GPP ( $\text{mol C m}^{-2}$ ) σε περίοδο 25 ετών .....	83
Διάγραμμα 3.1. Περιοριστικοί παράγοντες φυτικής παραγωγής ( <i>Picea abies</i> ) .....	87
Διάγραμμα 3.2. Παραγωγή ολικής βιομάζας C και N είδους δέντρου <i>Picea abies</i> ( $\text{mol m}^{-2}$ ) .....	87
Διάγραμμα 3.3. Πρόσληψη θρεπτικών ουσιών C, N, P, Ca, Mg και K ( $\text{mol m}^{-2}$ ) .....	88
Διάγραμμα 3.4. Απόθεμα C ( $\text{mol m}^{-2}$ ) στα φύλλα, στο ξυλώδη ιστό, στις ρίζες και στις μυκόρριζες του είδους δέντρου <i>Picea abies</i> .....	88
Διάγραμμα 3.5. Απόθεμα N ( $\text{mol m}^{-2}$ ) στα φύλλα, στο ξυλώδη ιστό και στις ρίζες του είδους δέντρου <i>Picea abies</i> .....	89
Διάγραμμα 3.6. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) στα τέσσερα εδαφικά στρώματα .....	90
Διάγραμμα 3.7. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου <53 $\mu\text{m}$ (AC1) κάθε εδαφικής στρώσης .....	91
Διάγραμμα 3.8. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους 53-250 $\mu\text{m}$ (AC2) κάθε εδαφικής στρώσης .....	91
Διάγραμμα 3.9. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους >250 $\mu\text{m}$ (AC3) κάθε εδαφικής στρώσης .....	92
Διάγραμμα 3.10. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου <53 $\mu\text{m}$ (AC1) σε κάθε εδαφική στρώση .....	92
Διάγραμμα 3.11. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους 53-250 $\mu\text{m}$ (AC2) σε κάθε εδαφική στρώση .....	93
Διάγραμμα 3.12. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους >250 $\mu\text{m}$ (AC3) σε κάθε εδαφική στρώση .....	93
Διάγραμμα 3.13. Σύγκριση συγκεντρώσεων $\text{Ca}^{2+}$ μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου ( $\text{mol L}^{-1}$ ) για το 1° εδαφικό στρώμα (0–10cm) .....	94
Διάγραμμα 3.14. Σύγκριση συγκεντρώσεων $\text{K}^{+}$ μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου ( $\text{mol L}^{-1}$ ) για το 1° εδαφικό στρώμα (0–10cm) .....	95
Διάγραμμα 3.15. Σύγκριση συγκεντρώσεων $\text{Mg}^{2+}$ μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου ( $\text{mol L}^{-1}$ ) για το 1° εδαφικό στρώμα (0–10cm) .....	95
Διάγραμμα 3.16. Σύγκριση συγκεντρώσεων $\text{Na}^{+}$ μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου ( $\text{mol L}^{-1}$ ) για το 1° εδαφικό στρώμα (0–10cm) .....	96
Διάγραμμα 3.17. Σύγκριση συγκεντρώσεων $\text{SO}_4^{2-}$ μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου ( $\text{mol L}^{-1}$ ) για το 1° εδαφικό στρώμα (0–10cm) .....	96
Διάγραμμα 3.18. WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ ) για χρονικό διάστημα 60 μηνών (2015-2019) .....	97
Διάγραμμα 3.19. Περιοριστικοί παράγοντες φυτικής παραγωγής ( <i>Picea abies</i> ) .....	98
Διάγραμμα 3.20. Κατανομή ολικής βιομάζας C και N του είδους δέντρου <i>Picea abies</i> ( $\text{mol m}^{-2}$ ) .....	99
Διάγραμμα 3.21. Πρόσληψη θρεπτικών συστατικών C, N, Ca, P, Mg και K ( $\text{mol m}^{-2}$ ) .....	99

Διάγραμμα 3.22. Απόθεμα C ( $\text{mol m}^{-2}$ ) στα φύλλα, στο ξυλώδη ιστό, στις ρίζες και τις μυκόρριζες του είδους δέντρου <i>Picea abies</i> .....	100
Διάγραμμα 3.23. Απόθεμα N ( $\text{mol m}^{-2}$ ) στα φύλλα, στο ξυλώδη ιστό και στις ρίζες του είδους δέντρου <i>Picea abies</i> .....	100
Διάγραμμα 3.24. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) στα τέσσερα εδαφικά στρώματα .....	101
Διάγραμμα 3.25. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος–αργίλου <53 $\mu\text{m}$ (AC1) κάθε εδαφικής στρώσης.....	102
Διάγραμμα 3.26. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους 53-250 $\mu\text{m}$ (AC2) κάθε εδαφικής στρώσης .....	102
Διάγραμμα 3.27. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους >250 $\mu\text{m}$ (AC3) κάθε εδαφικής στρώσης .....	103
Διάγραμμα 3.28. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος–αργίλου <53 $\mu\text{m}$ (AC1) σε κάθε εδαφική στρώση .....	103
Διάγραμμα 3.29. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους 53-250 $\mu\text{m}$ (AC2) σε κάθε εδαφική στρώση .....	104
Διάγραμμα 3.30. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους >250 $\mu\text{m}$ (AC3) σε κάθε εδαφική στρώση .....	104
Διάγραμμα 3.31. WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ ) για χρονικό διάστημα 300 μηνών (1996-2020).....	105
Διάγραμμα 3.32. Δείκτης ξηρασίας συναρτήσει δείκτη ανταπόκρισης .....	106
Διάγραμμα 3.33. Δείκτης ξηρασίας συναρτήσει δείκτη ανθεκτικότητας GPP .....	107
Διάγραμμα 3.34. Εδαφικός οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) μετά την προσθήκη κόμποστ .....	108
Διάγραμμα 3.35. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) συσσωματωμάτων μεγέθους ιλύος–αργίλου <53 $\mu\text{m}$ (AC1) μετά την προσθήκη κόμποστ .....	108
Διάγραμμα 3.36. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) συσσωματωμάτων μεγέθους 53-250 $\mu\text{m}$ (AC2) μετά την προσθήκη κόμποστ .....	109
Διάγραμμα 3.37. Οργανικός άνθρακας ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) συσσωματωμάτων μεγέθους >250 $\mu\text{m}$ (AC3) μετά την προσθήκη κόμποστ .....	109
Διάγραμμα 3.38. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος–αργίλου <53 $\mu\text{m}$ (AC1) μετά την προσθήκη κόμποστ .....	110
Διάγραμμα 3.39. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους 53-250 $\mu\text{m}$ (AC2) μετά την προσθήκη κόμποστ .....	110
Διάγραμμα 3.40. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους >250 $\mu\text{m}$ (AC3) μετά την προσθήκη κόμποστ .....	111
Διάγραμμα 3.41. Αρχική διακύμανση της GPP ( $\text{mol C m}^{-2}$ ) .....	111
Διάγραμμα 3.42. Διακύμανση της GPP ( $\text{mol C m}^{-2}$ ) μετά την προσθήκη οργανικής ύλης .....	112
Διάγραμμα 3.43. Αρχικό WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ ) .....	112
Διάγραμμα 3.44. WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ ) μετά την προσθήκη οργανικής ύλης.....	113

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### Σκοπός και αντικείμενο εργασίας

Βασικός σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η εύρεση των παραγόντων που επηρεάζουν την Ακαθάριστη Πρωτογενή Παραγωγή (GPP, Gross Primary Production) του δασικού οικοσυστήματος Zöbelboden στην Αυστρία. Για την ακρίβεια, η διπλωματική εργασία αναλύει εις βάθος τις εδαφικές λειτουργίες και δη τους μηχανισμούς του εδάφους που σχετίζονται με τους βιογεωχημικούς κύκλους ( $H_2O$ , C, N, P, S). Επιπροσθέτως, πραγματεύεται τις διεργασίες/διαδικασίες που επιτελεί το έδαφος εντός της κρίσιμης ζώνης (συσσωμάτωση, απορρόφηση θρεπτικών συστατικών, θρέψη φυτών, παραγωγή βιομάζας κλπ.), οι οποίες είναι κρίσιμες και άκρως απαραίτητες για την ύπαρξη της ζωής.

Για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας έγινε χρήση του μονοδιάστατου ολοκληρωμένου μοντέλου κρίσιμης ζώνης (1D-ICZ, Integrated Critical Zone) το οποίο αποτελείται από τέσσερα υπομοντέλα [Banwart et al., 2019, Nikolaidis et al., 2014]:

- HYDRUS-1D
- CAST
- PROSUM
- SAFE Weathering

Το μοντέλο 1D-ICZ είναι ικανό να προσομοιώσει τη ροή νερού και θερμότητας, τη μεταφορά διαλυτών ουσιών, την εδαφική δομή, τον σχηματισμό συσσωματωμάτων, τη δέσμευση οργανικού άνθρακα, τις μεταβολές της βιομάζας, την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και την κινητική διάλυσης ορυκτών [Banwart et al., 2019, Nikolaidis et al., 2014].

Ειδικότερα, το μοντέλο αρχικοποιήθηκε και βαθμονομήθηκε 2 φορές, αρχικά για ένα χρονικό διάστημα 5 ετών (2015-2019) και δευτερευόντως, για μια χρονική περίοδο 25 ετών (1996-2020). Η αρχικοποίηση (set up) και η βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου επετεύχθη κάνοντας χρήση των διαθέσιμων μετρήσεων πεδίου του σταθμού eLTER Zöbelboden. Μέσω της βαθμονόμησης των 5 ετών (60 μηνών) πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της παραγωγής της βιομάζας του είδους δέντρου *Picea abies* (έλατο Νορβηγίας), της πρόσληψης θρεπτικών συστατικών (C, N, K, P, Mg, Ca), των αποθεμάτων C και N στα διάφορα μέρη του είδους *Picea abies* (φύλλα, ξυλώδης ιστός, ρίζες, μυκόρριζες), της δέσμευσης άνθρακα σε όλη τη μάζα του εδάφους αλλά και στα κλάσματα συσσωμάτωσης, της μάζας των συσσωματωμάτων που είναι σταθερά στη διαβροχή και τέλος, των διαλυτών ουσιών  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  και  $SO_4^{2-}$  του εδαφικού διαλύματος. Η βαθμονόμηση των 25 ετών (300 μηνών) έγινε με παρόμοιο τρόπο αλλά δεν προσομοιώθηκαν οι διαλυτές ουσίες του εδαφικού διαλύματος λόγω έλλειψης μετρήσεων πεδίου. Επίσης, στο χρονικό διάστημα της 25ετίας προσδιορίστηκαν φαινόμενα ξηρασίας και διερευνήθηκε η επίδραση αυτών στην ανταπόκριση και την ανθεκτικότητα της Ακαθάριστης Πρωτογενούς Παραγωγής (GPP, Gross Primary Production). Τέλος, εκτελέστηκε ένα σενάριο προσθήκης οργανικής ύλης (εδαφοβελτιωτικού) και μελετήθηκε η επίδραση της αλλαγής της δομής του εδάφους στο GPP.

Η πτυχιακή εργασία περιλαμβάνει 4 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται εν συντομία το αντικείμενο και ο σκοπός της εργασίας. Επιπλέον, αναλύεται εκτενώς το



θεωρητικό υπόβαθρο του αντικειμένου χρησιμοποιώντας διεθνή, επιστημονικά βιβλιογραφικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται τα χαρακτηριστικά, τις λειτουργίες του εδάφους, την ποιότητά του, τις διεργασίες που επιτελεί και τα φαινόμενα υποβάθμισής του με έμφαση στο φαινόμενο της ξηρασίας. Ακόμη, περιγράφει τις ροές των βασικών χημικών ουσιών στα χερσαία οικοσυστήματα και παρουσιάζει τα καταλληλότερα μοντέλα προσομοίωσης των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών στο εδαφικό προφίλ. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αρχικοποίηση και τη βαθμονόμηση του μοντέλου 1D-ICZ και των επιμέρους υπομοντέλων του (HYDRUS-1D, CAST, PROSUM, SAFE). Επίσης, παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού του WUE (μέσω της ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγής και της εξατμισοδιαπνοής) και μελετάται 1) η επίδραση της ξηρασίας στην GPP (απόκριση), 2) η επίδραση της ξηρασίας στην ανθεκτικότητα της GPP και 3) η επίδραση της αλλαγής δομής του εδάφους (προσθήκη κόμποστ) στην GPP. Στο τρίτο κεφάλαιο απεικονίζονται τα αποτελέσματα α) της μοντελοποίησης των μετρήσεων του πεδίου και β) της ανάλυσης GPP σε μορφή διαγραμμάτων. Τα αποτελέσματα σχολιάζονται κριτικά και αναφέρονται τυχόν αδυναμίες. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας και κάποιες μελλοντικές προτάσεις που θα συνεισφέρουν στην έρευνα. Τέλος, στα Παραρτήματα της εργασίας υπάρχουν 1) το εγχειρίδιο στησίματος των μοντέλων HYDRUS-1D, CAST, PROSUM, SAFE και 1D-ICZ για 60 μήνες, 2) οι πίνακες αρχικοποίησης των μοντέλων HYDRUS-1D και PROSUM, 3) το εγχειρίδιο χρήσης του λογισμικού DrinC για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας RDI και 4) οι πίνακες μελέτης της επίδρασης της ξηρασίας στην GPP.

## **1.1. Έδαφος**

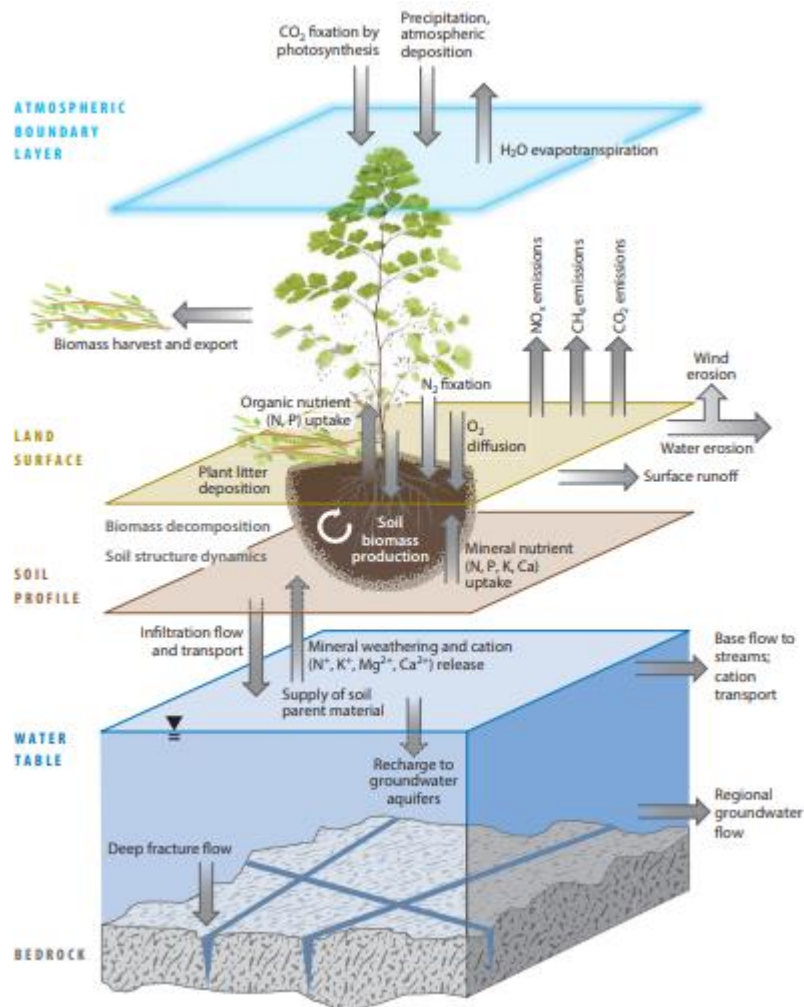
### **1.1.1. Χαρακτηριστικά και λειτουργίες**

Το έδαφος ορίζεται ως το ανώτερο στρώμα του γήινου φλοιού, το οποίο απαρτίζεται από οργανική ύλη, νερό, αέρα, ζωντανούς οργανισμούς και ορυκτά [COM(2002) 179]. Είναι ένα πολυφασικό σύστημα που αποτελείται από στερεά, υγρά και αέρια, σε ποσοστά 50, 15-35 και 15-35% του ολικού όγκου αντίστοιχα [Ugolini, Spaltenstein, 1992]. Σύμφωνα με ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής της 16<sup>ης</sup> Απριλίου 2002 (Commission of the European Communities 2002) για την προστασία του εδάφους, το έδαφος έχει κάποια βασικά χαρακτηριστικά. Αρχικά, συνιστά προϊόν πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ βλάστησης, γεωλογίας, κλίματος και βιολογικής δραστηριότητας. Είναι μεταβλητό μέσο αφού αποτελείται από πολλά στρώματα, καθένα από τα οποία έχει διαφορετικές φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες. Δευτερευόντως, το έδαφος είναι ένας μη ανανεώσιμος πόρος, ο οποίος χαρακτηρίζεται από γρήγορη υποβάθμιση και αργούς ρυθμούς σχηματισμού και ανάκαμψης. Η υποβάθμιση οδηγεί στην ανικανότητα του εδάφους να εκτελέσει τις λειτουργίες που είναι απαραίτητες για τη ζωή. Επίσης, έχει αξιοσημείωτη ικανότητα ρύθμισης και αποθήκευσης νερού, οργανικής ύλης, χημικών ουσιών, μετάλλων και αερίων. Τέλος, αποτελεί το μέσο με το οποίο επιτυγχάνεται η γεωργία, αφού διέπεται από άφθονη βιοποικιλότητα, η οποία συμβάλλει σημαντικά στη γονιμότητα και κατ' επέκταση στην παραγωγή τροφίμων – απαραίτητων για την ανθρώπινη επιβίωση [COM(2002) 179].

Το έδαφος είναι ένα οικοσύστημα, δηλαδή, ένα σύνθετο, δυναμικό σύστημα εσωτερικών και εξωτερικών αλληλεπιδράσεων [Χατζημπίρος, 2014]. Τα περισσότερα

οικοσυστήματα λαμβάνουν ενέργεια μέσω του ήλιου και υλικά μέσω της ατμόσφαιρας και των ορυκτών, τα οποία μεταφέρονται στο οικοσύστημα και τελικά, διαφεύγουν στο περιβάλλον. Ένα οικοσύστημα αποτελείται από βιοτικούς και αβιοτικούς παράγοντες. Οι βιοτικοί παράγοντες είναι τα φυτά που δεσμεύουν ηλιακή ενέργεια για να μεταφέρουν άνθρακα προς το οικοσύστημα, οι αποικοδομητές, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη διάσπαση της νεκρής οργανικής ύλης, με ταυτόχρονη απελευθέρωση CO<sub>2</sub> και θρεπτικών συστατικών – διαθέσιμων σε μικροοργανισμούς, και τα ζώα, τα οποία φέρνουν ενέργεια και υλικά στο οικοσύστημα ρυθμίζοντας τη δραστηριότητα των αποσυνθετών και των φυτών. Οι αβιοτικοί παράγοντες ενός οικοσυστήματος είναι το νερό, η ατμόσφαιρα και τα ορυκτά πετρώματα [Chapin et al., 2011]. Το εδαφικό οικοσύστημα εκτελεί πληθώρα περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών λειτουργιών, οι οποίες είναι καθοριστικής σημασίας για την ύπαρξη ζωής [COM(2002) 179]. Γενικά, οι λειτουργίες του εδάφους είναι ροές και μετασχηματισμοί ενέργειας, μάζας και γενετικής πληροφορίας με αποτέλεσμα την σύνδεση του εδάφους με την κρίσιμη ζώνη. Πιο συγκεκριμένα, οι εδαφικές λειτουργίες περιλαμβάνουν (Σχ.1.1):

- Παραγωγή βιομάζας και τροφίμων
- Μετασχηματισμός θρεπτικών ουσιών και αποθήκευσή τους απ' τα φυτά
- Διήθηση και αποθήκευση νερού για μείωση πλημμυρών και παροχή διαθέσιμου ύδατος στα φυτά
- Μεταφορά νερού σε υπόγειους υδροφορείς, ποτάμια, λίμνες κ.α.
- Ανταλλαγή αερίων με την ατμόσφαιρα με ταυτόχρονη παροχή θερμών αερίων μαζών για ενεργειακή αποθήκευση, αποικοδόμηση και ανακύκλωση αποβλήτων
- Ανάπτυξη και διατήρηση βιοποικιλότητας μέσω της εξασφάλισης ενδιαιτημάτων για τα διάφορα βιολογικά είδη
- Διαφύλαξη φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς
- Παραγωγή πρώτων υλών όπως άμμος, ορυκτά πετρώματα κ.α. [Banwart et al., 2019]



Σχήμα 1.1. Εδαφικές Λειτουργίες [Banwart et al., 2019]

### 1.1.2. Υφή και δομή

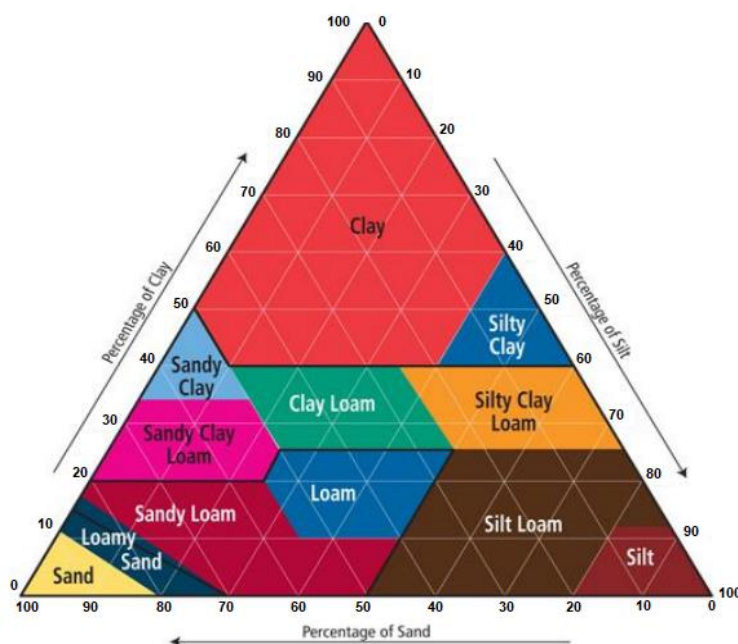
Το έδαφος αποτελεί ένα μίγμα σωματιδίων ποικίλης κοκκομετρικής σύστασης, με πόρους γεμάτους με νερό και αέρα [Βαβίζος, Μερτζάνης, 2003]. Εδαφική υφή ονομάζεται η επί τοις εκατό αναλογία των ποικίλου μεγέθους σωματιδίων που συγκροτούν το έδαφος. Η δομή του εδάφους είναι ο τρόπος διάταξης των οργανικών και ανόργανων σωματιδίων που οδηγεί στη δημιουργία συσσωματωμάτων [Τερζίδης, Παπαζαφειρίου, 1997]. Η εδαφική δομή καθορίζεται από τα ποσοστά της στερεάς, της υγρής και της αέριας φάσης του εδάφους και από τη διάταξη των πόρων. Οι διαστάσεις και η κοκκομετρική σύσταση των στερεών αποτελούν δείκτες προσδιορισμού του πορώδους και του περιεχομένου του εδάφους σε ύδωρ και αέρα [Βαβίζος, Μερτζάνης, 2003]. Βάσει του τρόπου διάταξης των εδαφικών σωματιδίων, τα εδάφη κατηγοριοποιούνται σε 6 τύπους δομής. Οι τύποι δομής είναι τα ελαφρά μονόκκοκα εδάφη, τα βαριά μονόκκοκα, τα κυβικής μορφής εδάφη, τα πλακώδη, τα κοκκώδη και τέλος, τα πρισματικά εδάφη. Τα κοκκώδη και τα ελαφρά μονόκκοκα εδάφη έχουν μειωμένη ικανότητα συγκράτησης νερού ενώ αντίθετα, τα βαριά μονόκκοκα εδάφη έχουν εξαιρετικά αυξημένη ικανότητα συγκράτησης ύδατος. Τα εναπομείναντα είδη δομής έχουν μέτρια ικανότητα συγκράτησης νερού [Τερζίδης,

Παπαζαφειρίου, 1997]. Μια ακόμη κατηγοριοποίηση γίνεται με βάση τη διάμετρο των σωματιδίων. Τα εδάφη διακρίνονται σε κατηγορίες οι οποίες ονομάζονται μηχανικά κλάσματα (Πιν.1.1) τα οποία αποτελούνται από τα υλικά διαμέτρου  $>2\text{mm}$  και από την λεπτή Γη, δηλαδή από σωματίδια διαμέτρου μεταξύ  $0.002\text{--}2\text{mm}$  [Βαβίζος, Μερτζάνης, 2003].

Τα τρία κύρια συστατικά ενός εδάφους είναι η άμμος (sand), η ιλύς (silt) και η άργιλος (clay). Σωματίδια διαμέτρου μεταξύ  $0.05$  και  $2\text{mm}$  είναι άμμος, σωματίδια διαμέτρου μεταξύ  $0.002$  και  $0.05\text{mm}$  είναι ιλύς και σωματίδια με διάμετρο μικρότερη από  $0.002\text{mm}$  είναι άργιλος. Μηχανική ανάλυση ονομάζεται η διαδικασία κατάταξης των εδαφών βάσει της ποσοστιαίας αναλογίας τους σε άμμο, ιλύ και άργιλο. Τα εδάφη διακρίνονται σε 12 κλάσεις υφής (Πιν.1.1) που απεικονίζονται στο τρίγωνο μηχανικής σύστασης εδαφών ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής της άμμου, της ιλύος και της αργίλου (Σχ.1.2) [Τερζίδης, Παπαζαφειρίου, 1997].

Πίνακας 1.1. Κλάσματα μηχανικής σύστασης εδαφών [Βαβίζος, Μερτζάνης, 2003]

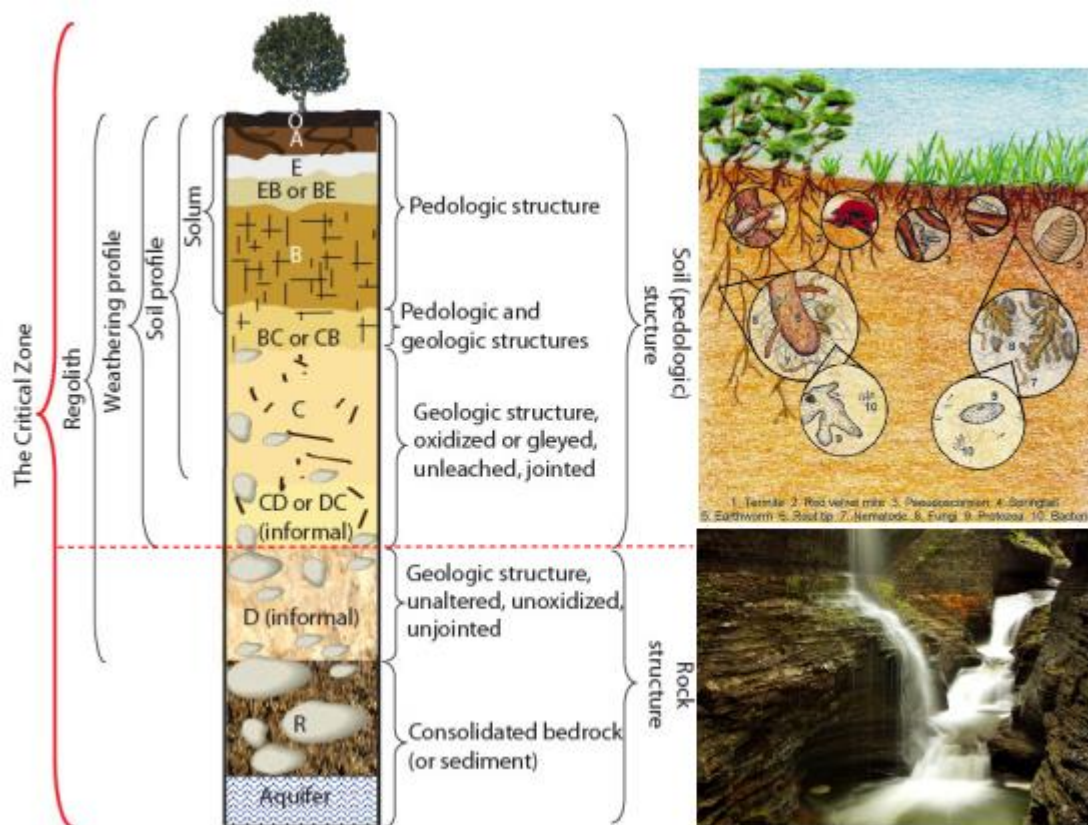
Κλάση	Συνδυασμοί
Αμμώδη	Αμμώδη (Sand)
	Αμμοπηλώδη (Sandy loam)
Πηλώδη	Πηλοαμμώδη (Loamy sand)
	Αμμοαργιλόπηλώδη (Sandy clay loam)
	Πηλώδη (Loam)
	Ιλοπηλώδη (Silt loam)
	Ιλοαργιλόπηλώδη (Silty clay loam)
Αργιλώδη	Ιλυώδη (Silt)
	Αργιλοπηλώδη (Clay loam)
	Ιλοαργιλώδη (Silty Clay)
	Αργιλοαμμώδη (Sandy clay)
	Αργιλώδη (Clay)



Σχήμα 1.2. Τρίγωνο Μηχανικής Σύστασης Εδαφών [Ζιώβα, 2012]

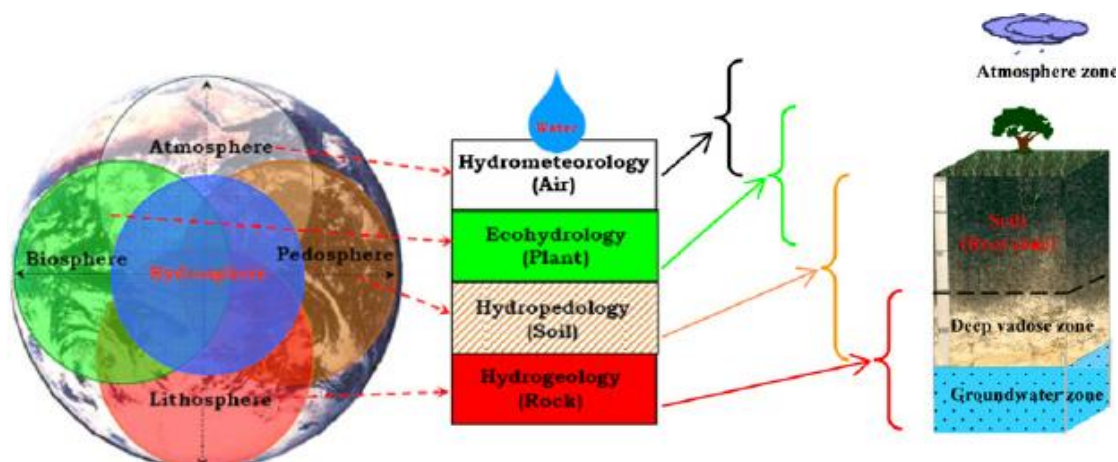
### 1.1.3. Η κρίσιμη ζώνη της Γης

Οι οικοσυστημικές διεργασίες και οι εδαφικές λειτουργίες μπορούν να μελετηθούν σε διάφορες χωρικές κλίμακες, όπως αυτή της κρίσιμης ζώνης της Γης (CZ, Critical Zone). Η κρίσιμη ζώνη της Γης ορίζεται ως ένα ετερογενές περιβάλλον που συμπεριλαμβάνει αλληλεπιδράσεις μεταξύ βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων (νερό, αέρας, οργανισμοί κ.α.) στο οποίο οι ζωντανοί οργανισμοί καθορίζουν το φυσικό περιβάλλον. Η κρίσιμη ζώνη της Γης είναι το επιφανειακό στρώμα της Γης που εκτείνεται από το ανώτερο μέρος της βλάστησης μέχρι τον πυθμένα των υδροφορέων (Σχ.1.3). Αποτελείται από την παιδόσφαιρα (έδαφος) και τις επιφάνειες της βιόσφαιρας (φυτά), της ατμόσφαιρας (αέρας), της υδρόσφαιρας (νερό) και της λιθόσφαιρας (ορυκτά) (Σχ.1.4). Το έδαφος είναι ο πυρήνας της κρίσιμης ζώνης, στο οποίο πραγματοποιείται ανταλλαγή νερού, ενέργειας, διαλυμένων ουσιών, αερίων κ.α. με την ατμόσφαιρα, τη βιόσφαιρα, την υδρόσφαιρα και τη λιθόσφαιρα [Lin, 2010]. Η κρίσιμη ζώνη θα μπορούσε να παραλληλιστεί με έναν αντιδραστήρα τροφοδοσίας, στον οποίο φυσικές και χημικές διεργασίες σε συνδυασμό με βιολογικούς παράγοντες λειτουργούν συνεργειστικά με αποτέλεσμα την αφομοίωση και την μεταφορά ύλης [Anderson et al., 2007].



Σχήμα 1.3. Η κρίσιμη ζώνη της Γης [Lin, 2010]





Σχήμα 1.4. Σύνδεση μεταξύ παιδόσφαιρας, βιόσφαιρας, λιθόσφαιρας, υδρόσφαιρας και ατμόσφαιρας της Γης [Li et al., 2012]

#### 1.1.4. Υποβάθμιση

Το έδαφος απειλείται από πληθώρα δραστηριοτήτων οι οποίες υποβαθμίζουν τη βιωσιμότητα και τη διαθεσιμότητά του. Οι απειλές αποτελούν ένα πολύπλοκο ζήτημα, διηπειρωτικής κλίμακας, το οποίο αν δεν αντιμετωπιστεί με την κατάλληλη διαχείριση μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλοιώσεις στο έδαφος. Όταν διάφορες απειλές εμφανιστούν ταυτόχρονα τότε οι επιπτώσεις τους λειτουργούν σωρευτικά και έτσι το έδαφος είναι ανίκανο να επιτελέσει τις βασικές του λειτουργίες. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) πάνω από το 16% της έκτασης (52 εκατομμύρια εκτάρια) βρίσκεται υπό την επίδραση κάποιας διαδικασίας υποβάθμισης. Σε περιοχές που βρίσκονται σε καθεστώς ξηρασίας η υποβάθμιση του εδάφους ονομάζεται ερημοποίηση. Η ερημοποίηση επηρεάζεται: α) από τις συνθήκες του κλίματος δηλαδή από την ξηρασία και τις βροχοπτώσεις και β) από την δραστηριότητα των ανθρώπων δηλαδή την αποδάσωση και την υπερβόσκηση. Οι κύριες διαδικασίες υποβάθμισης των εδαφών είναι η διάβρωση, η μείωση της οργανικής ύλης, η ρύπανση, η στεγανοποίηση, η συμπίεση του εδάφους, η ελάττωση της βιοποικιλότητας και η αλάτωση.

Η διάβρωση είναι ένα γεωλογικό φαινόμενο που έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση και απομάκρυνση εδαφικών σωματιδίων μέσω του νερού ή του ανέμου. Παράγοντες όπως οι απότομες κλίσεις πλαγιών, οι κλιματικές συνθήκες, η χρήση/ κάλυψη Γης, οι πυρκαγιές και κάποια χαρακτηριστικά του εδάφους πυροδοτούν το φαινόμενο της διάβρωσης και οδηγούν στην απώλεια του εδάφους. Εκτός από τη διάβρωση, μια διαδικασία υποβάθμισης των εδαφών είναι η ελάττωση της εδαφικής οργανικής ύλης. Η οργανική ύλη του εδάφους περιλαμβάνει υπολείμματα ριζών, φύλλων, εκκριμάτων, ζωντανούς οργανισμούς και το χούμο που είναι το σταθεροποιημένο προϊόν της βιοαποικοδόμησης της εδαφικής οργανικής ύλης. Η οργανική ύλη εξασφαλίζει την γονιμότητα του εδάφους, το βοηθά να εκτελεί τις κύριες λειτουργίες του και να αντέχει στη διάβρωση. Επίσης, περιορίζει τη διάχυση της ρύπανσης από το έδαφος στο ύδωρ. Η συσσώρευση και η ελάττωση της οργανικής ύλης επηρεάζεται από τις γεωργικές και δασοκομικές πρακτικές. Η συσσώρευση της εδαφικής οργανικής ύλης συμβαίνει με αργούς ρυθμούς και επωφελείται από το καθόλου έως ελαφρύ όργωμα, την προσθήκη οργανικών λιπασμάτων, κοπριάς (manure), κόμπост (compost) και χλωρής λίπανσης.

Η ρύπανση του εδάφους αποτελεί απειλή για τις εδαφικές λειτουργίες και μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση του νερού. Η παρουσία ρύπων στο έδαφος έχει αρνητικό αντίκτυπο στην τροφική αλυσίδα, αποτελεί κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία και τα οικοσυστήματα. Μια άλλη διαδικασία υποβάθμισης του εδάφους είναι η στεγανοποίηση του εδάφους, δηλαδή η τοποθέτηση σπιτιών, δρόμων κ.α. η οποία ελαττώνει την επιφάνεια επιτέλεσης των εδαφικών λειτουργιών (διείσδυση ομβρίων υδάτων), αλλάζει τη ροή του νερού και αυξάνει την διάσπαση της βιοποικιλότητας. Εκτός της διάβρωσης, της μείωσης οργανικής ύλης, της ρύπανσης και της στεγανοποίησης, η συμπίεση του εδάφους υποβαθμίζει το έδαφος ελατώνοντας το χώρο των πόρων μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων με αποτέλεσμα το έδαφος να μην μπορεί να απορροφήσει νερό, θρεπτικά συστατικά και έτσι δεν μπορεί να αναπτύξει το ριζικό του σύστημα. Επιπροσθέτως, μειώνεται η γονιμότητα, η σταθερότητα και η μικροβιακή δραστηριότητα και σε περιπτώσεις βροχοπτώσεων το νερό δεν μπορεί να διηθηθεί με ευκολία στο έδαφος. Η συμπίεση προκαλείται όταν σ' ένα κορεσμένο έδαφος ασκείται πίεση μέσω μηχανημάτων ή υπερβόσκησης.

Η μείωση της βιοποικιλότητας είναι μια από τις απειλές που πλήττει ανεπανόρθωτα το έδαφος. Στο έδαφος ζει και ευημερεί πληθώρα ζωντανών οργανισμών όπως είναι τα βακτήρια, τα πρωτόζωα, οι μύκητες οι οποίοι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση φυσικών, χημικών και βιολογικών ιδιοτήτων που είναι κρίσιμα για την εδαφική γονιμότητα. Επίσης, μεγαλύτεροι οργανισμοί π.χ. σαλιγκάρια, σκουλήκια, αρθρόποδα είναι υπεύθυνοι για τη διάσπαση, την αποσύνθεση της οργανικής ύλης και την μεταφορά της στα βαθύτερα εδαφικά στρώματα. Η βιοποικιλότητα είναι δείκτης ποιότητας του εδάφους καθώς εκείνη είναι που καθιστά τα εδάφη ευάλωτα και επιρρεπή σε διαδικασίες υποβάθμισης. Η χρήση ακατάλληλων φυτοφαρμάκων, ζιζανιοκτόνων και εντομοκτόνων εμποδίζουν τη δραστηριότητα βακτηρίων και μυκήτων μειώνοντας έτσι τη διαθέσιμη οργανική ύλη άρα και τη βιοποικιλότητα. Αντίθετα, η χρήση βιολογικών προϊόντων ενισχύει και διατηρεί τη βιοποικιλότητα του εδάφους.

Η τελευταία διαδικασία υποβάθμισης των εδαφών είναι η αλάτωση. Αλάτωση είναι η παρουσία διαλυτών αλάτων ασβεστίου, μαγνησίου και νατρίου στα εδάφη με αποτέλεσμα την ελάτωση της γονιμότητας. Η διαδικασία της αλάτωσης οφείλεται στην άρδευση αφού στο νερό περιέχονται σημαντικές ποσότητες αλάτων. Η αλάτωση επιδεινώνεται σε περιοχές με λίγες βροχοπτώσεις και υψηλούς ρυθμούς εξατμισοδιαπνοής καθώς και σε εδάφη που παρεμποδίζουν την έκπλυση. Σε παράκτιες περιοχές, η αλάτωση συνδέεται με το φαινόμενο της υφαλμύρινης δηλαδή, της υπεράντλησης υπογείου ύδατος, η οποία χαμηλώνει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και προκαλεί εισροή του θαλασσινού νερού [COM(2002) 179].

#### **1.1.5. Ξηρασία**

Η ξηρασία αναγνωρίζεται ως μια περιβαλλοντική καταστροφή η οποία οφείλεται στις διακυμάνσεις του κλίματος. Η ξηρασία είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή ποσότητα εισερχόμενου διαθέσιμου ύδατος για εκτεταμένη χρονική περίοδο (π.χ. εποχή, έτος). Το φαινόμενο της ξηρασίας εμφανίζεται στις περισσότερες κλιματικές ζώνες, έχει μεγάλη χρονική διάρκεια και συνήθως, η εύρεση της έναρξης και της λήξης της είναι μια πολύπλοκη διαδικασία [Τσακίρης, 2013]. Η ξηρασία εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία, την υγρασία, τους ανέμους και τα χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων (συχνότητα, ένταση, διάρκεια,

κατανομή). Ο υπερπληθυσμός, η εξάπλωση της γεωργίας, της βιομηχανίας και της ενέργειας αυξάνουν την κατανάλωση του νερού και οδηγούν στη λειψυδρία δηλαδή, την ελάττωση των διαθέσιμων αποθεμάτων νερού και κατ' επέκταση στην αδυναμία κάλυψης των περιβαλλοντικών και ανθρωπίνων αναγκών. Το φαινόμενο της ξηρασίας έχει άμεσες επιπτώσεις στην ποσότητα και την ποιότητα των επιφανειακών και υπογείων υδάτων, μειώνει την παραγωγικότητα, διαταράσσει το περιβάλλον και όλους τους τομείς της οικονομίας [Mishra, Singh, 2010].

Με την πάροδο των χρόνων έχουν διατυπωθεί διάφοροι ορισμοί της ξηρασίας όμως κανένας ορισμός δεν είναι καθολικός επειδή είναι αδύνατο να περιγράψει όλες τις περιπτώσεις [Τσακίρης, 2013]. Συνήθως, οι ορισμοί της ξηρασίας χωρίζονται σε δυο κατηγορίες:

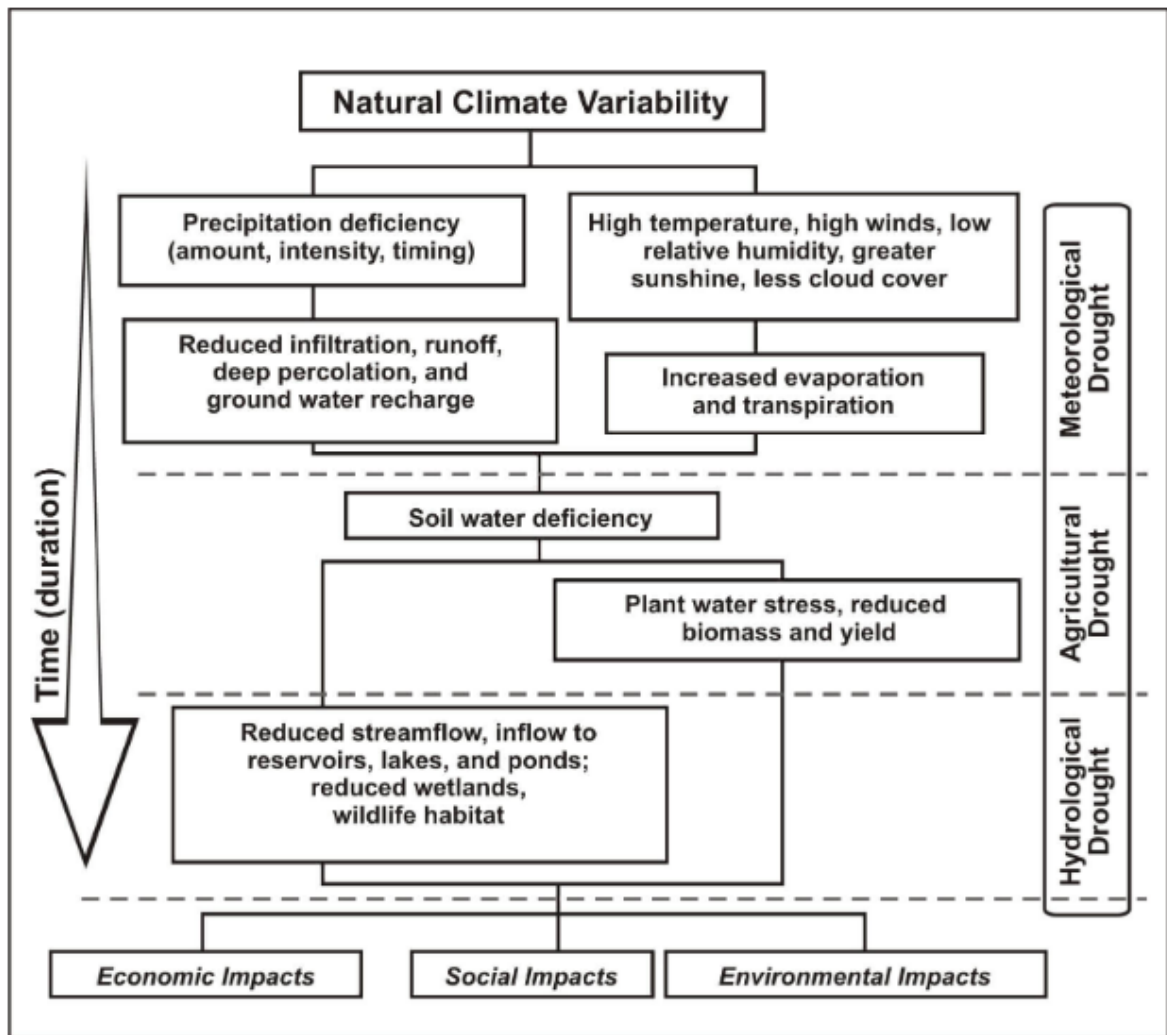
- Εννοιολογικοί – που περιγράφουν τη ξηρασία ως μια μεγάλη, ξηρή περίοδο.
- Επιχειρησιακοί – που περιγράφουν τη ξηρασία καθορίζοντας την αρχή, το τέλος, την ένταση και το μέγεθός της.

Εκτός από τη διάκριση των ορισμών της ξηρασίας, η ξηρασία αυτή καθ' εαυτή διακρίνεται σε τέσσερις κατηγορίες:

- 1) Μετεωρολογική ξηρασία, όπου είναι μια περίοδος που χαρακτηρίζεται από έλλειψη βροχοπτώσεων (Σχ.1.5).
- 2) Υδρολογική ξηρασία, η οποία εξαρτάται από τη γεωλογία και είναι μια περίοδος με μειωμένη διαθεσιμότητα επιφανειακών και υπόγειων υδατικών αποθεμάτων (Σχ.1.5).
- 3) Γεωργική ξηρασία, η οποία εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους και συνήθως οδηγεί σε μειωμένη ανάπτυξη και παραγωγή των καλλιεργειών (Σχ.1.5).
- 4) Κοινωνικο-οικονομική ξηρασία, είναι ουσιαστικά η λειψυδρία κατά την οποία το διαθέσιμο νερό δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες των ανθρώπων. Η λειψυδρία είναι συνέπεια είτε της υπερκατανάλωσης είτε της ξηρασίας [Mishra, Singh, 2010, Τσακίρης, 2013].

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στις παραπάνω τέσσερις κατηγορίες ξηρασίας θα μπορούσε να προστεθεί και μια πέμπτη κατηγορία, η ξηρασία των υπογείων υδάτων. Η ξηρασία των υπογείων υδάτων εμφανίζεται με μια χρονική διάρκεια μηνών ή ετών και οδηγεί σε ελάττωση της στάθμης των αποθεμάτων νερού στο υπέδαφος [Mishra, Singh, 2010].





Σχήμα 1.5. Κατηγορίες ξηρασίας [National Drought Mitigation Center, <https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx>]

Τα χαρακτηριστικά της κάθε ξηρασίας μπορούν να βρεθούν με τη χρήση των λεγόμενων «δεικτών ξηρασίας» [Τσακίρης, 2013]. Οι δείκτες ξηρασίας καθορίζουν την επίδραση της ξηρασίας και παράγοντες όπως η ένταση, η διάρκεια, η έκταση κλπ. [Mishra, Singh, 2010]. Είναι αντιπροσωπευτικοί για κάθε κατηγορία ξηρασίας (μετεωρολογική, υδρολογική, γεωργική) και εξαρτώνται από τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής που μελετάται. Οι δείκτες ξηρασίας κάνουν χρήση της θερμοκρασίας, της βροχόπτωσης, της εξατμισοδιαπνοής, της απορροής καθώς και άλλων παραμέτρων. Οι πιο γνωστοί δείκτες ξηρασίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2.

Οι πρώτοι δείκτες που δημιουργήθηκαν είναι οι μετεωρολογικοί δείκτες ξηρασίας (meteorological drought indices) δηλαδή, οι δείκτες που περιγράφουν την μετεωρολογική ξηρασία κάνοντας χρήση των βασικών μετεωρολογικών παραμέτρων. Οι δείκτες αυτοί είναι ευρέως διαδεδομένοι και εύκολοι στη χρήση τους καθώς λαμβάνουν υπόψη λίγες παραμέτρους [Τσακίρης, 2013]. Κάποια παραδείγματα μετεωρολογικών δεικτών ξηρασίας είναι οι deciles, ο Standardized Precipitation Index (SPI), ο Rainfall Anomaly Index (RAI), ο Reconnaissance Drought Index (RDI) και ο Palmer Drought Severity Index (PDSI) [Keyantash, Dracup, 2002].

Εκτός από τους μετεωρολογικούς δείκτες ξηρασίας αναπτύχθηκαν οι υδρολογικοί δείκτες ξηρασίας (hydrological drought indices), οι οποίοι περιγράφουν την υδρολογική ξηρασία και δη, το υδατικό ισοζύγιο ενός συστήματος ή μιας λεκάνης απορροής [Τσακίρης, 2013]. Μερικά παραδείγματα υδρολογικών δεικτών ξηρασίας είναι ο Palmer Hydrological Drought Index (PHDI), ο Surface Water Supply Index (SWSI) και ο Cumulative Streamflow Anomaly (CSA) [Keyantash, Dracup, 2002].

Επίσης, δημιουργήθηκαν οι δείκτες γεωργικής ξηρασίας (agricultural drought indices), οι οποίοι αναφέρονται στη γεωργική ξηρασία και εξαρτώνται από παραμέτρους όπως η υγρασία του εδάφους (moisture), η βροχόπτωση, η εξατμισοδιαπνοή κ.α. Οι δημοφιλέστεροι δείκτες γεωργικής ξηρασίας είναι ο Crop Moisture Index (CMI), ο Palmer Drought Severity Index (PDSI) ο οποίος αποτελεί και μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας, ο Soil Moisture Drought Index (SMDI) και ο Evapotranspiration Deficit Index (ETDI).

Τέλος, τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν οι λεγόμενοι «τηλεσκοπικοί ή δορυφορικοί δείκτες ξηρασίας» οι οποίοι εφαρμόζουν τεχνολογίες τηλεσκοπήσης. Οι δείκτες αυτοί βρίσκουν ανωμαλίες στη βλάστηση (ξηρασία) χρησιμοποιώντας δορυφορικά δεδομένα που αφορούν την επιφάνεια της Γης (κατάσταση, ποιότητα, τύπος, στάδιο ανάπτυξης). Οι βασικότεροι δορυφορικοί δείκτες είναι ο Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), ο Vegetation Condition Index (VCI), ο Temperature Condition Index (TCI) και ο Drought Severity Index (DSI) [Τσακίρης, 2013].

Πίνακας 1.2. Δείκτες ξηρασίας [Τσακίρης, 2013]

α/α	Ονομασία δείκτη	Συντομογραφία
1	Aggregate Drought Index	ADI
2	Agricultural Drought Index	DT <sub>x</sub>
3	Anomaly Of Normalized Difference Vegetation Index	NDVIA
4	Base Flow Index	BFI
5	Bhalme and Mooley Drought Index	BMDI
6	Colorado Palmer Drought Index	CPDI
7	Consecutive Dry Days	CDD
8	Corn Drought Index	CDI
9	Crop Moisture Index	CMI
10	Crop Specific Drought Index	CSDI
11	Cumulative Precipitation Anomaly	CPA
12	Cumulative Streamflow Anomaly	CSA
13	Deciles	DECILES
14	Drought Area Index	DAI
15	Drought Frequency Index	DFI
16	Drought Severity Index	DSI
17	Effective Drought Index	EDI
18	Evapotranspiration Deficit Index	ETDI
19	Foley Drought Index	FDI
20	Global Vegetation Water moisture Index	GVWI
21	Groundwater Resource Index	GRI
22	Keetch-Byam Drought Index	KBDI
23	Leaf Water Content Index	LWCI

24	Low Flow Index	LFI
25	Modified Perpendicular Drought Index	MPDI
26	Moisture Availability Index	MAI
27	Normalized Burn Ratio	NBR
28	Normalized Difference Infrared Index	NDII
29	Normalized Difference Vegetation Index	NDVI
30	Normalized Difference Water Index	NDWI
31	Normalized Multi-Band Drought Index	NMDI
32	Normalized Precipitation Index	NPI
33	Palfai Aridity Index	PAI
34	Palmer Drought Severity Index	PDSI
35	Palmer Hydrological Drought Index	PHDI
36	Palmer Modified Drought Index	PMDI
37	Palmer Z-index	Z-index
38	Percent of Normal Precipitation	PN
39	Perpendicular Drought Index	PDI
40	Rainfall Anomaly Index	RAI
41	Rainfall Deficiency Index	RDI
42	Reclamation Drought Index	RDI
43	Reconnaissance Drought Index	RDI
44	Regional Streamflow Deficiency Index	RSDI
45	Remote Sensing Drought Risk Index	RDRI
46	Runoff Deficiency Index	RDI
47	Simple Ratio Water Index	SRWI
48	Soil Moisture Anomaly Index	SMAI
49	Soil Moisture Deficit Index	SMDI
50	Soil Moisture Drought Index	SMDI
51	Soybean Drought Index	SCI
52	Sperling Drought Index	SDI
53	Standardized Anomaly Index	SAI
54	Standardized Precipitation Index	SPI
55	Standardized Streamflow Index	SSI
56	Standardized Vegetation Index	SVI
57	Streamflow Drought Index	SDI
58	Surface Water Supply Index	SWSI
59	Temperature Condition Index	TCI
60	Theory of Runs	Run
61	Total Storage Deficit Index	TSDI
62	Vegetation Condition Albedo Drought Index	VCADI
63	Vegetation Condition Index	VCI
64	Vegetation Drought Response Index	VegDRI
65	Vegetation Health Index	VHI
66	Water Index	WI

### i) **Palmer Drought Severity Index (PDSI)**

Ο δείκτης PDSI δημιουργήθηκε από τον W.C. Palmer (1965) και αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Αποτελεί τον δημοφιλέστερο μετεωρολογικό δείκτη ξηρασίας και εξαρτάται από τη βροχόπτωση (precipitation), την εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration) και την εδαφική υγρασία (moisture) [Τσακίρης, 2013]. Ο PDSI εκτιμά τους παράγοντες του υδατικού ισοζυγίου ενός εδαφικού μοντέλου 2 στρωμάτων και υπολογίζει τις συνθήκες υγρασίας. Είναι ένας αδιάστατος αριθμός μεταξύ 4 και -4 (Πιν.1.3). Όταν ο δείκτης PDSI λαμβάνει αρνητικές τιμές τότε αυτό σημαίνει ότι υπάρχει έλλειμμα νερού [Keyantash, Dracup, 2002]. Η κατάταξη της ξηρασίας βάσει των τιμών του PDSI παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3. Κατάταξη ξηρασίας βάσει δείκτη PDSI [Ding et al., 2009]

PDSI	Κατηγορία ξηρασίας
$\geq 4.00$	Ακραία υγρή
3.00 έως 3.99	Πολύ υγρή
2.00 έως 2.99	Μέτρια υγρή
1.00 έως 1.99	Ελαφρώς υγρή
0.50 έως 0.99	Αρχή υγρής περιόδου
0.49 έως -0.49	Κανονικές συνθήκες
-0.50 έως -0.99	Αρχή ξηρής περιόδου
-1.00 έως -1.99	Ήπια ξηρή
-2.00 έως -2.99	Μέτρια ξηρή
-3.00 έως -3.99	Σημαντικά ξηρή
$\leq -4.00$	Ακραία ξηρή

### ii) **Reconnaissance Drought Index (RDI)**

Ο δείκτης RDI δημιουργήθηκε από τους Tsakiris και Vangelis (2005). Αναπτύχθηκε για να προσεγγίζει το έλλειμμα ύδατος μέσα από ένα ισοζύγιο εισροών και εκροών του συστήματος. Ο RDI χρησιμοποιεί τιμές βροχόπτωσης (P) και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PET) και υπολογίζεται για ένα υδρολογικό έτος (με αρχή του τον μήνα Οκτώβριο) για περιόδους 3, 6 και 12 μηνών. Η αρχική τιμή του RDI εκτιμάται ως εξής [Τσακίρης, 2013]:

$$\alpha_k = \frac{\sum_{j=1}^k P_j}{\sum_{j=1}^k PET_j} \quad (1.1)$$

όπου,

- $\alpha_k$  η αρχική τιμή του RDI για μήνα k
- $P_j$  η βροχόπτωση μήνα j του υδρολογικού έτους
- $PET_j$  η δυνητική εξατμισοδιαπνοή μήνα j του υδρολογικού έτους

Η παράμετρος  $\alpha_k$  δεν είναι ικανή να προσδιορίσει την ύπαρξη ή όχι ξηρασίας σε μια περιοχή οπότε λύση στο εν λόγω πρόβλημα έρχονται να δώσουν δυο παραλλαγές του δείκτη RDI, ο Normalized RDI και ο Standardized RDI. Ο Normalized RDI υπολογίζεται από την εξίσωση 1.2 και ο Standardized RDI από την εξίσωση 1.3 [Τσακίρης, 2013].

$$RDI_n(k) = \frac{a_k}{\bar{a}_k} - 1 \quad (1.2) \quad RDI_{st}(k) = \frac{y_k - \bar{y}_k}{\hat{\sigma}_k} \quad (1.3)$$

όπου,

- $\bar{a}_k$  ο αριθμητικός μέσος όρος του  $a_k$
- $y_k = \ln(a_k)$
- $\bar{y}_k$  ο αριθμητικός μέσος όρος του  $y_k$
- $\hat{\sigma}_k$  η τυπική απόκλιση

Η χρήση της εξίσωσης 1.3 γίνεται με την παραδοχή ότι οι τιμές  $\alpha_k$  ακολουθούν τη λογαριθμική κανονική κατανομή. Βέβαια οι τιμές  $\alpha_k$  ακολουθούν και τη κατανομή γάμμα οπότε ο Standardized RDI μπορεί να υπολογιστεί και βάσει αυτής της κατανομής [Τσακίρης, 2013]. Η κατάταξη της ξηρασίας βάσει των τιμών του RDI παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.4.

Πίνακας 1.4. Κατάταξη ξηρασίας βάσει δείκτη RDI [Τσακίρης, 2013]

RDI	Κατηγορία ξηρασίας
$\geq 2.00$	Ακραία υγρή
1.50 έως 1.99	Πολύ υγρή
1.00 έως 1.49	Μέτρια υγρή
-0.99 έως 0.99	Κανονικές συνθήκες
-1.00 έως -1.49	Μέτρια ξηρή
-1.50 έως -1.99	Πολύ ξηρή
$\leq -2.00$	Ακραία ξηρή

### iii) Standardized Precipitation Index (SPI)

Ο δείκτης SPI δημιουργήθηκε από τους McKee et al. (1993), βασίζεται σε χρονοσειρές βροχόπτωσης και υπολογίζεται για χρονικά διαστήματα 1, 3, 6, 9, 12 μηνών [Keyantash, Dracup, 2002]. Οι μετρήσεις βροχόπτωσης αρχικά, προσαρμόζονται στην κατανομή πιθανότητας γάμμα και κατόπιν, μετασχηματίζονται σε κανονική κατανομή. Η μετατροπή σε κανονική κατανομή δείχνει ότι ο μέσος SPI για το χρονικό διάστημα και τη περιοχή που μελετάται ισούται με μηδέν [Mishra, Singh, 2010]. Η κανονική κατανομή διευκολύνει την σύγκριση των δεικτών SPI διαφόρων περιοχών καθώς και την εύρεση πιθανότητας εμφάνισης ξηρασίας στις περιοχές αυτές [Keyantash, Dracup, 2002]. Η κατανομή γάμμα ορίζεται από την συνάρτηση πιθανότητας  $g(x)$  [Tigkas et al., 2015]:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad x > 0 \quad (1.4)$$

όπου,

- $\beta$  η παράμετρος κλίμακας  $= \frac{\bar{x}}{\alpha}$
- $\alpha$  η παράμετρος σχήματος  $= \frac{1}{4A} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$ , με  $A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$
- $n$  ο αριθμός παρατηρήσεων
- $x$  η ποσότητα βροχόπτωσης
- $\Gamma(\alpha)$  η συνάρτηση γάμμα

Ο δείκτης ξηρασίας SPI, όπως ο δείκτης ξηρασίας RDI, κυμαίνεται μεταξύ 2 και -2 (Πίν.1.5). Ο SPI λαμβάνει θετικές τιμές όταν η βροχόπτωση είναι υψηλότερη της μέσης τιμής βροχόπτωσης ενώ λαμβάνει αρνητικές τιμές όταν η βροχόπτωση είναι χαμηλότερη της μέσης τιμής βροχόπτωσης [Τσακίρης, 2013].

Πίνακας 1.5. Κατάταξη ξηρασίας βάσει δείκτη SPI [Τσακίρης, 2013]

<b>SPI</b>	<b>Κατηγορία ξηρασίας</b>
$\geq 2.00$	Ακραία υγρή
1.50 έως 1.99	Πολύ υγρή
1.00 έως 1.49	Μέτρια υγρή
-0.99 έως 0.99	Κανονικές συνθήκες
-1.00 έως -1.49	Μέτρια ξηρή
-1.50 έως -1.99	Πολύ ξηρή
$\leq -2.00$	Ακραία ξηρή

#### iv) **Surface Water Supply Index (SWSI)**

Ο δείκτης SWSI δημιουργήθηκε από τους Shafer και Dezman (1982) και αποτελεί δείκτη υδρολογικής ξηρασίας σε περιοχές με έντονη χιονόπτωση [Keyantash, Dracup, 2002]. Ο δείκτης ξηρασίας SWSI υπολογίζεται μέσω μετρήσεων χιονόπτωσης, βροχόπτωσης, επιφανειακής απορροής και αποθήκευσης ταμιευτήρων. Κύριος σκοπός του είναι η παρακολούθηση αντικανονικών συνθηκών σε πηγές επιφανειακών υδάτων [Mishra, Singh, 2010]. Ο SWSI κυμαίνεται μεταξύ 4 και -4 όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.6.

Πίνακας 1.6. Κατάταξη ξηρασίας βάσει δείκτη SWSI [Wambua et al., 2017]

<b>SWSI</b>	<b>Κατηγορία ξηρασίας</b>
$\geq 4.00$	Ακραία υγρή
1.99 έως 3.99	Υγρή
-0.99 έως 2.00	Κανονικές συνθήκες
-1.00 έως -1.99	Αρχή ξηρής περιόδου
-2.00 έως -2.99	Μέτρια ξηρή
-3.00 έως -3.99	Πολύ ξηρή
$\leq -4.00$	Ακραία ξηρή

## **v) Crop Moisture Index (CMI)**

Ο CMI είναι ένας δείκτης γεωργικής ξηρασίας ο οποίος αναπτύχθηκε από τον Palmer (1968). Σκοπός του είναι η αξιολόγηση των συνθηκών εδαφικής υγρασίας (soil moisture) – παράμετρος που αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο των καλλιεργειών. Χρησιμοποιεί δεδομένα θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εδαφικής υγρασίας και υπολογίζει το έλλειμμα εξατμισοδιαπνοής καθώς και το νερό που αναπληρώνεται στο έδαφος σε χρονικό διάστημα μιας εβδομάδας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως ο δείκτης CMI δεν αποτελεί κατάλληλο μέσο παρακολούθησης της ξηρασίας σε βάθος χρόνου [Keyantash, Dracup, 2002].

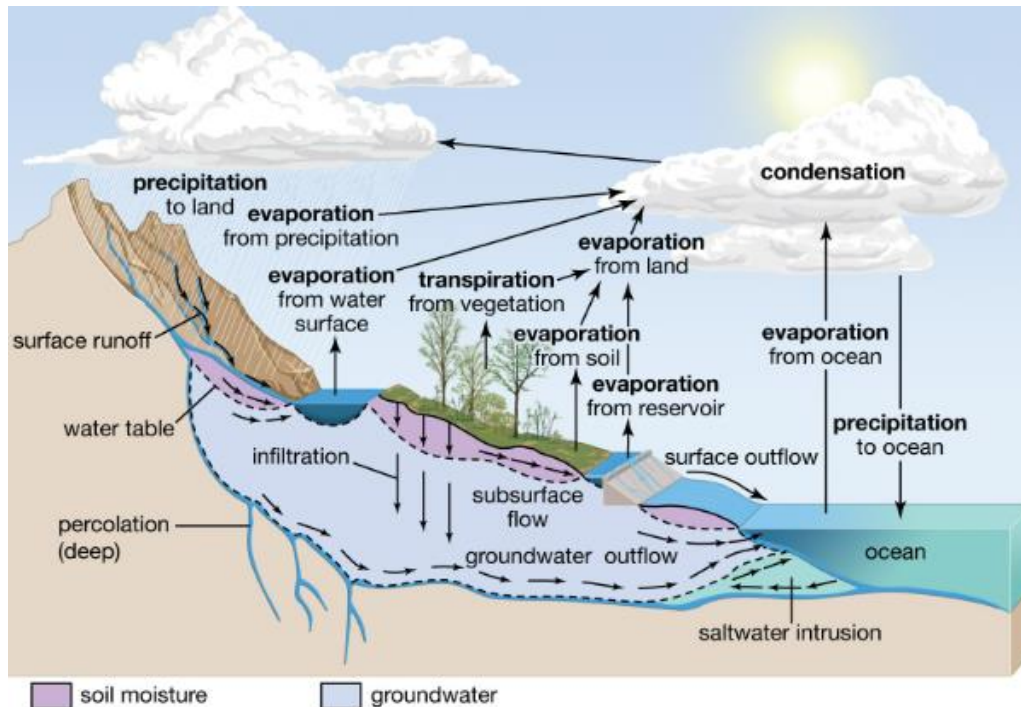
### **1.2. Ροές χημικών ουσιών στα οικοσυστήματα**

Στα οικοσυστήματα επιτυγχάνεται μια αέναη κυκλοφορία χημικών ουσιών οργανικής και ανόργανης μορφής που είναι απαραίτητη για την ευημερία και τον πολλαπλασιασμό των πληθυσμών. Οι οργανισμοί αφού αναζητήσουν και παραλάβουν τις ωφέλιμες για αυτούς ουσίες, απορρίπτουν οργανικά και ανόργανα απορρίμματα στο περιβάλλον. Επομένως, η ανακύκλωση των βασικών χημικών στοιχείων και ουσιών η οποία πραγματοποιείται εντός βιοτικού και αβιοτικού περιβάλλοντος, σχηματίζει τους λεγόμενους βιογεωχημικούς κύκλους των διαφόρων στοιχείων. Οι σημαντικότεροι βιογεωχημικοί κύκλοι είναι οι κύκλοι του νερού ( $H_2O$ ), του άνθρακα (C), του αζώτου (N), του φωσφόρου (P) και του θείου (S) οι οποίοι θα αναλυθούν λεπτομερώς παρακάτω [Χατζημήτρος, 2014].

#### **1.2.1. Κυκλοφορία νερού σ' ένα οικοσύστημα**

Ο κύκλος του νερού (ή υδρολογικός κύκλος) αποτελεί τον πιο σημαντικό βιογεωχημικό κύκλο των οικοσυστημάτων (Σχ.1.6). Το νερό όντας ανόργανη ένωση που υπάρχει στο μεγαλύτερο ποσοστό της ύλης, διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη δυναμική του οικοσυστήματος. Εμφανίζεται σε 3 φάσεις, στην στερεή (ατμόσφαιρα), στην υγρή (υδρόσφαιρα) και στην αέρια (λιθόσφαιρα). Το νερό, αρχικά εισέρχεται στο οικοσύστημα μέσω της κατακρήμνισης υπό μορφή βροχής, χιονιού, χαλαζιού κ.α. Στην συνέχεια, το ύδωρ αφού φτάσει στην επιφάνεια του ξηράς μπορεί να ακολουθήσει τρία διαφορετικά μονοπάτια. Μέσω της υπόγειας απορροής, το νερό διηθείται προς τα βαθύτερα στρώματα του εδάφους όπου ένα μέρος συγκρατείται και αποθηκεύεται από τη βλάστηση και την οργανική ύλη, ενώ ένα άλλο εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς. Μέσω της εξατμισοδιαπνοής, δηλαδή της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους και της διαπνοής μέσω των φυτών, το νερό επιστρέφει στην ατμόσφαιρα [Χατζημήτρος, 2014]. Η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί βασική διεργασία του ενεργειακού ισοζυγίου της Γης καθώς αντιπροσωπεύει το 80% της μεταφοράς θερμότητας από τη Γη στην ατμόσφαιρα [Chapin et al., 2011]. Κατά την εξατμισοδιαπνοή και συγκεκριμένα, κατά τη διαπνοή, το κατ' ανάπτυξη φυτό λαμβάνει νερό μαζί με διαλυμένα θρεπτικά συστατικά μέσω του ριζικού συστήματός του. Μέσω των φυτικών ιστών, αυτό το νερό καταλήγει στα φύλλα και δη, στα στομάτια των φύλλων, τα οποία όταν είναι ανοιχτά μεταφέρουν το νερό υπό μορφής υδρατμών στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα [Τερζίδης, Παπαζαφειρίου, 1997]. Εκτός της υπόγειας απορροής και της εξατμισοδιαπνοής, το νερό μέσω της επιφανειακής απορροής, μπορεί να καταλήξει

στη θάλασσα, σε ποτάμια και λίμνες. Η απουσία βλάστησης ευνοεί την διαδικασία της επιφανειακής απορροής και εκείνη με τη σειρά της, συμβάλει στην εμφάνιση του φαινομένου της διάβρωσης των εδαφών. Τελικά, μέσω της επιφανειακής και της υπόγειας απορροής, μεγάλο ποσό ύδατος καταλήγει στη θάλασσα, απ' όπου και εξατμίζεται, επιστρέφοντας στην ατμόσφαιρα [Χατζημπίρος, 2014].



Σχήμα 1.6. Ο κύκλος του νερού [<https://www.britannica.com/science/water-cycle>]

### 1.2.2. Κυκλοφορία άνθρακα σ' ένα οικοσύστημα

Η εισροή ενέργειας και του μεγαλύτερου ποσού άνθρακα στα οικοσυστήματα πραγματοποιείται μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Στην οικοσυστημική κλίμακα, η φωτοσύνθεση ονομάζεται ακαθάριστη πρωτογενής παραγωγή (GPP, Gross Primary Production). Η ακαθάριστη πρωτογενής παραγωγή παρουσιάζει ημερήσιες και εποχικές διακυμάνσεις ανάλογα με τις αυξομειώσεις του φωτός, της θερμοκρασίας και της παροχής του αζώτου. Ωστόσο, διαφορές σε ετήσιες τιμές GPP μεταξύ των οικοσυστημάτων προκύπτουν λόγω της ποσότητας ιστού και της διάρκειας της δραστηριότητάς του. Μέσω της φωτοσύνθεσης, τα φυτά παραλαμβάνουν ηλιακή ακτινοβολία του ορατού φάσματος, καταναλώνουν  $\text{CO}_2$  και παράγουν οργανικές ενώσεις. Στην συνέχεια, ο οργανικός άνθρακας και μέρος της ενέργειας του ήλιου μεταφέρονται μεταξύ των συστατικών του οικοσυστήματος έως ότου τελικά, να επιστραφούν στην ατμόσφαιρα μέσω των διαδικασιών της αναπνοής και της καύσης. Τα φυτά, μέσω της αναπνοής τους, επιστρέφουν το 50% της GPP με απώτερο στόχο την πρόσληψη της απαιτούμενης ενέργειας για την ανάπτυξη και την ευημερία τους. Εκτός από την GPP, εισάγεται και ο όρος "καθαρή πρωτογενής παραγωγή" (NPP, Net Primary Production) που ονομάζεται το καθαρό όφελος άνθρακα μέσω της βλάστησης και είναι ίσο με τη διαφορά μεταξύ της GPP και της αναπνοής που διενεργείται από τα φυτά (Σχ.1.7). Η ακαθάριστη πρωτογενής παραγωγή (GPP) και η καθαρή πρωτογενής παραγωγή (NPP) μετρούνται για σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα π.χ. ετήσια και



έχουν μονάδες g βιομάζας ή g C m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>. Η NPP περιλαμβάνει την παραγωγή βιομάζας από τα φυτά, τις εκκρίσεις των διαλυτών οργανικών ενώσεων από τις ρίζες στο χώμα (root exudation), τον άνθρακα που μεταφέρεται στα μικρόβια που συνυπάρχουν αρμονικά με τις ρίζες (μυκόρριζες, mycorrhizae), την αφαίρεση C από τα φυτοφάγα ζώα και τις εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) που απελευθερώνουν C στην ατμόσφαιρα (Πιν.1.7).

Πίνακας 1.7. Βασικά συστατικά NPP [Chapin et al., 2011]

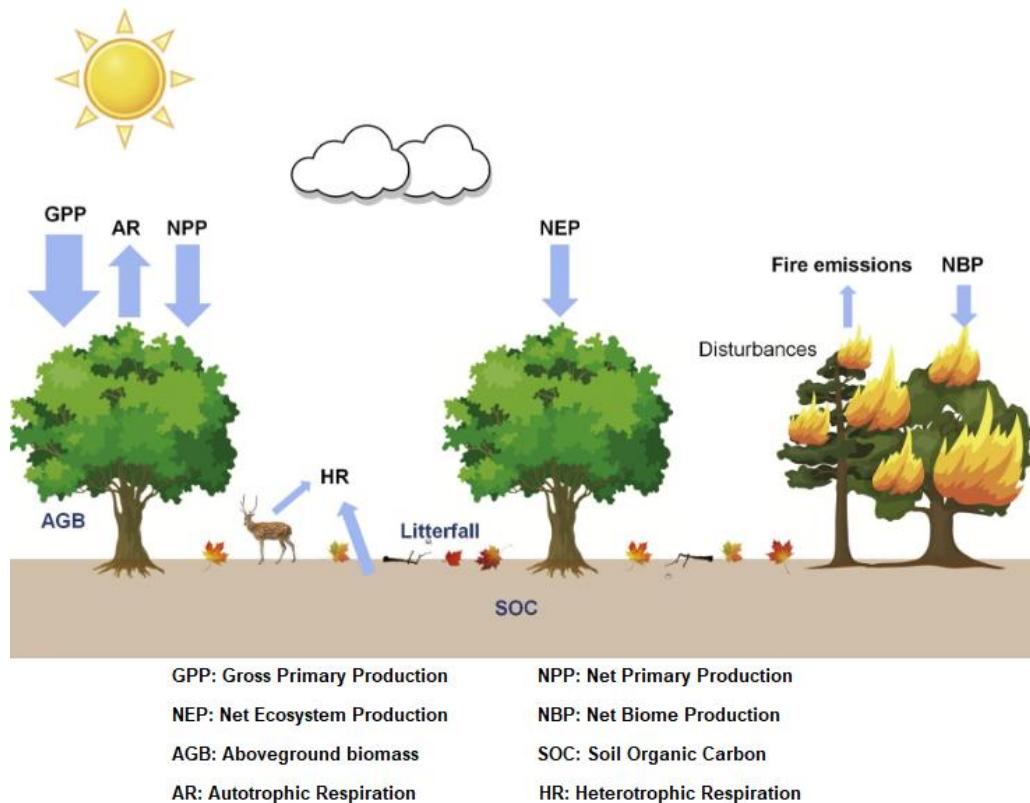
Βασικά συστατικά NPP	% NPP
Βιομάζα από φυτά	40-70
Εκκρίσεις διαλυτών οργανικών ενώσεων	10-30
Μυκόρριζες	15-30
Απώλειες C από φυτοφάγα ζώα	1-40
Εκπομπές VOCs	0-5

Η μεταφορά C από τα φυτά στο έδαφος μέσω φυτικών υπολειμμάτων, εκκρίσεων ενζύμων και μυκορριζών και η αποσύνθεση αυτών, οδηγούν στη δημιουργία εδαφικής οργανικής ύλης (SOM, Soil Organic Matter). Αποσύνθεση είναι η διαδικασία φυσικής και χημικής διάσπασης των φυτικών, ζωικών υπολειμμάτων (νεκρή οργανική ύλη) με ταυτόχρονη απελευθέρωση άνθρακα στην ατμόσφαιρα και θρεπτικών συστατικών σε μορφές τέτοιες που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή φυτών και μικροβίων. Η αποσύνθεση έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της μάζας των υπολειμμάτων, καθώς αυτά διασπώνται και μετατρέπονται σε ανόργανα θρεπτικά συστατικά και CO<sub>2</sub>. Η διαδικασία της αποσύνθεσης είναι ζωτικής σημασίας για τα οικοσυστήματα, γιατί αν δεν συνέβαινε, τα οικοσυστήματα θα συσσωρευαν σε μικρό χρονικό διάστημα μεγάλες ποσότητες υπολειμμάτων. Η συσσώρευση αυτή, με την σειρά της, θα οδηγούσε σε δέσμευση θρεπτικών σε μορφές μη διαθέσιμες για τα φυτά και σε εξάντληση του ατμοσφαιρικού CO<sub>2</sub>. Η αποσύνθεση είναι αποτέλεσμα τριών τύπων διεργασιών, καθεμία με τους δικούς της ελέγχους και επιπτώσεις:

- 1) Έκπλυση – μεταφορά διαλυτών ουσιών μέσω του νερού, οι οποίες ή απορροφούνται από οργανισμούς, ή αντιδρούν με την ορυκτή φάση του εδάφους και των ιζημάτων, ή χάνονται από το σύστημα.
- 2) Τεμαχισμός μεγάλων κομματιών οργανικής ύλης σε μικρότερα από τα ζώα. Επίσης, τα ζώα αναμιγνύουν την οργανική ύλη που έχει υποστεί αποσύνθεση, στο έδαφος και με τα περιττώματά τους επιστρέφουν μέρος της οργανικής ύλης στο έδαφος.
- 3) Χημική μετατροπή νεκρής οργανικής ύλης λόγω δραστηριότητας βακτηρίων και μυκήτων. Οι περισσότερες ενώσεις των υπολειμμάτων λόγω του μεγέθους τους δεν μπορούν να περάσουν δια μέσω των μικροβιακών μεμβρανών. Επομένως, τα μικρόβια εκκρίνουν εξωκυτταρικά ένζυμα για να διασπάσουν τα υπολείμματα. Τα εξωκυτταρικά ένζυμα μετατρέπουν τα μακρομόρια σε διαλυτά προϊόντα, τα οποία απορροφούνται και μεταβολίζονται από τα βακτήρια και τους μύκητες. Επιπροσθέτως, τα μικρόβια παράγουν πολυσακχαρίτες που προέρχονται από περιττά προϊόντα μεταβολισμού των μικροβίων (π.χ. ανόργανο N, CO<sub>2</sub>), οι οποίοι επιτρέπουν την προσκόλληση των εδαφικών σωματιδίων. Τα μικρόβια, μετά την λύση τους διατίθενται για αποσύνθεση.

Η αποσύνθεση, λοιπόν, είναι αποτέλεσμα της έκπλυσης, του κατακερματισμού και της χημικής μετατροπής, αλλά κυρίως των 2 τελευταίων διαδικασιών. Έχει ως αποτέλεσμα την κάλυψη των ενεργειακών και διατροφικών απαιτήσεων των αποικοδομητών.

Συνέπειές της είναι η ανοργανοποίηση της οργανικής ύλης σε  $\text{CO}_2$ , θρεπτικά συστατικά και νερό και η μετατροπή μικρού μέρους της οργανικής ύλης σε ανθεκτικές, πολύπλοκες οργανικές ενώσεις (χούμος) [Chapin et al., 2011]. Το χούμος είναι ένα εξαιρετικά πολυσύνθετο σκουρόχρωμο μίγμα οργανικών ενώσεων το οποίο είναι ανθεκτικό σε περαιτέρω μικροβιακή αποδόμηση και διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στην συγκράτηση νερού και θρεπτικών συστατικών [Chapin et al., 2011, Χατζημπίρος, 2014].



Σχήμα 1.7. Ροές άνθρακα [Xiao et al., 2019]

### 1.2.3. Κυκλοφορία αζώτου σ' ένα οικοσύστημα

Οι κύριες οδοί εισροής αζώτου σε ένα οικοσύστημα είναι η βιολογική δέσμευση, η εναπόθεση και η ανοργανοποίηση. Αντίθετα, οι κύριες οδοί απώλειας αζώτου είναι η νιτροποίηση, η απονιτροποίηση και η εξάτμιση της αμμωνίας ( $\text{NH}_3$ ).

Το άζωτο εισέρχεται στο οικοσύστημα κυρίως μέσω της βιολογικής δέσμευσης του ατμοσφαιρικού αζώτου. Τα βακτήρια που δεσμεύουν άζωτο, παράγουν το ένζυμο "νιτρογενάση" το οποίο σπάει τους τριπλούς δεσμούς του αζώτου και το μειώνει μετατρέποντάς το σε αμμωνιακά ( $\text{NH}_4^+$ ) και νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ) τα οποία βοηθούν στην ανάπτυξη των βακτηρίων. Η μείωση του αζώτου από την νιτρογενάση, είναι μια διαδικασία υψηλής απαίτησης σε ενέργεια, οπότε, πραγματοποιείται μόνο όταν τα βακτήρια έχουν μεγάλη παροχή υδρογονανθράκων και φωσφόρου. Τα βακτήρια που είναι υπεύθυνα για την μείωση του αζώτου, όταν συμβιώνουν αρμονικά με τα φυτά τα οποία παρέχουν πληθώρα υδρογονανθράκων, κατέχουν τα υψηλότερα ποσοστά αζωτοδέσμευσης. Το δεσμευμένο άζωτο στα φυτά, μέσω της παραγωγής και της αποσύνθεσης των πλούσιων σε άζωτο απορριμμάτων, γίνεται διαθέσιμο σε άλλα

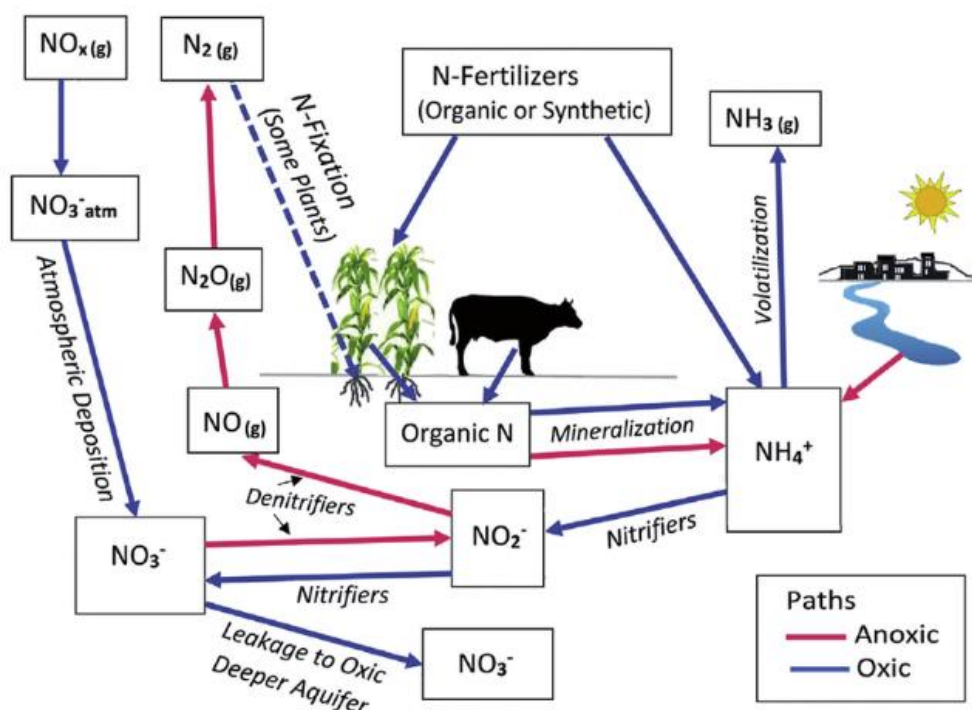
φυτά. Συχνά, περιορισμοί βιοτικών και αβιοτικών παραγόντων στη δέσμευση του αζώτου οδηγούν το άζωτο σε περιορισμό εντός των οικοσυστημάτων. Σε πολλά οικοσυστήματα η δέσμευση του αζώτου μειώνεται λόγω διαθεσιμότητας άλλων θρεπτικών συστατικών όπως ο φώσφορος (P), το θείο (S), ο σίδηρος (Fe) και το μολυβδαίνιο (Mo).

Ένας άλλος τρόπος εισροής του αζώτου στα οικοσυστήματα είναι μέσω της ατμοσφαιρικής εναπόθεσης όπου το άζωτο μπορεί να βρίσκεται σε σωματιδιακή, σε διαλυμένη και σε αέρια μορφή. Η εναπόθεση του αζώτου σ' ένα οικοσύστημα γίνεται με τρεις τρόπους:

- 1) Υγρή εναπόθεση – παροχή διαλυμένων θρεπτικών συστατικών μέσω κατακρήμνισης
- 2) Ξηρή εναπόθεση – παροχή ενώσεων υπό μορφής αερολυμάτων μέσω καθίζησης, πρόσκρουσης και απορρόφησης
- 3) Εναπόθεση σύννεφου-νερού – παροχή θρεπτικών συστατικών μέσω σταγονιδίων νερού σε φυτικές επιφάνειες εντός ομίχλης

Πάνω από το 99% του αζώτου του εδάφους περιέχεται στη νεκρή οργανική ύλη που προέρχεται από φυτά, ζώα και μικρόβια. Τα μικρόβια παράγουν εξωκυτταρικά ένζυμα με απώτερο στόχο την αποικοδόμηση της νεκρής οργανικής ύλης. Κατά τη διαδικασία αυτή απελευθερώνεται διαλυμένο άζωτο (DON, Dissolved Organic Nitrogen) το οποίο απορροφάται από φυτά, μυκορριζικούς μύκητες και αποικοδομητές για να ευνοηθεί η ανάπτυξη τους. Οι μικροοργανισμοί για να υποστηρίξουν τις απαιτήσεις τους σε ενέργεια, διασπούν το DON και χρησιμοποιούν τον C για να αναπτυχθούν και να συντηρηθούν, παράγοντας ταυτόχρονα  $\text{NH}_4^+$  στο έδαφος. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ανοργανοποίηση ή αμμωνιοποίηση του αζώτου και έχει ως βασικό προϊόν το  $\text{NH}_4^+$ . Σε περίπτωση που το DON δεν φτάνει για να καλύψει τις ανάγκες των μικροοργανισμών σε άζωτο, τότε τα μικρόβια απορροφούν ανόργανο άζωτο (συνήθως  $\text{NH}_4^+$ ) από το διάλυμα του εδάφους. Ακινητοποίηση του αζώτου ονομάζεται η απομάκρυνση του ανόργανου αζώτου με μικροβιακή απορρόφηση και χημική σταθεροποίηση [Chapin et al., 2011].

Σε κάποια οικοσυστήματα, τα  $\text{NH}_4^+$  μέσω της νιτροποίησης του αζώτου μετατρέπονται σε νιτρώδη ( $\text{NO}_2^-$ ) και κατόπιν, σε νιτρικά ( $\text{NO}_3^-$ ) τα οποία είναι πιο χρήσιμα για τις βιολογικές διεργασίες. Η νιτροποίηση πραγματοποιείται από τα αυτοτροφικά χημικοσυνθετικά βακτήρια "νιτροσομονάδα" (*Nitrosomonas*) και "νιτροβακτήριο" (*Nitrobacter*). Η διαδικασία με την οποία τα  $\text{NO}_3^-$  ανάγονται αρχικά σε υποξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ ) και στη συνέχεια σε άζωτο ( $\text{N}_2$ ) ονομάζεται απονιτροποίηση. Το  $\text{N}_2\text{O}$  ανάγεται σε  $\text{N}_2$  είτε μέσω μικροβιακής δράσης είτε μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα κλείνοντας έτσι τον κύκλο του αζώτου (Σχ.1.8) [Chapin et al., 2011, Χατζημπίρος, 2014].



Σχήμα 1.8. Ποές αζώτου [Breida et al., 2019]

#### 1.2.4. Κυκλοφορία φωσφόρου σ' ένα οικοσύστημα

Ο φώσφορος (P) αποτελεί θρεπτικό συστατικό του οποίου η ανακύκλωση μέσω των φυτών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το άζωτο. Αυτά τα δύο χημικά στοιχεία λόγω της μικρής τους διαθεσιμότητας στο διάλυμα του εδάφους δεν καλύπτουν τις ανάγκες των φυτών και έτσι συνήθως αποτελούν τους περιοριστικούς παράγοντες αρκετών οικοσυστημάτων [Charin et al., 2011]. Βέβαια, ο φώσφορος φαίνεται να είναι ο περιοριστικός παράγοντας στα περισσότερα οικοσυστήματα αφού σχηματίζει εύκολα αδιάλυτες ενώσεις (μέσω των ορθοφωσφορικών –  $\text{PO}_4^{3-}$ ) που αποτρέπουν την παραλαβή φωσφόρου από τα φυτά και δεν δημιουργεί αέριες ενώσεις άρα, δεν έχει την ικανότητα ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας [Χατζημπίρος, 2014].

Με το φώσφορο και το άζωτο να αποτελούν κινητήρια συστατικά στη φωτοσύνθεση και την αναπνοή των φυτών, δεν είναι παράξενο το γεγονός ότι έχουν ομοιότητες στις διαδικασίες των κύκλων τους (Σχ.1.9). Ειδικότερα, οι μυκορριζικοί μύκητες μέσω της διάσπασης της σωματιδιακής οργανικής ύλης (POM, Particulate Organic Matter) που περιέχει φώσφορο και άζωτο, απορροφούν τα δύο θρεπτικά στοιχεία και τα μεταφέρουν στο ριζικό σύστημα των φυτών. Στην συνέχεια, τα φυτοφάγα ζώα καταναλώνουν φυτά και μέσω της αποικοδόμησης των περιττωμάτων τους ή των ιδίων παράγεται εκ νέου εκμεταλλεύσιμος φώσφορος και άζωτο. Εκτός από τα κοινά χαρακτηριστικά του φωσφόρου και του αζώτου, οι διαφορές στη χημεία αποδυναμώνουν και διαταράσσουν την συνέργεια των κύκλων τους. Η πρώτη διαφορά είναι το διαφορετικό μονοπάτι που ακολουθεί το κάθε στοιχείο για να εισέλθει στο οικοσύστημα [Charin et al., 2011]. Ο φώσφορος αποτελεί βασικό συστατικό της λιθόσφαιρας και μέσω της απόπλυσης της επιφάνειας του εδάφους και της ροής του νερού εισέρχεται τελικά στα οικοσυστήματα [Χατζημπίρος, 2014]. Το άζωτο, από την άλλη, εισέρχεται στο οικοσύστημα μέσω της δέσμευσής του από την ατμόσφαιρα η

οποία αποτελεί δεξαμενή αζώτου. Η δεύτερη διαφοροποίηση είναι η επεξεργασία της νεκρής οργανικής ύλης. Κατά την αποσύνθεση του φωσφόρου, οι δεσμοί C-O-P διασπώνται από ένζυμα χωρίς το σπάσιμο του άνθρακα, ενώ κατά την αποσύνθεση του αζώτου, το άζωτο είναι άμεσα συνδεδεμένο με τον άνθρακα (C-N) και έτσι για την απελευθέρωση του αζώτου το σπάσιμο του άνθρακα είναι προαπαιτούμενο. Κεντρικό ρόλο στη διαθεσιμότητα του φωσφόρου στα οικοσυστήματα διαδραματίζουν οι χημικές αντιδράσεις με τα ορυκτά του εδάφους. Ο φώσφορος δεν υπόκειται σε αντιδράσεις οξειδοαναγωγής όπως το άζωτο και οι αντιδράσεις που ρυθμίζουν τη διαθεσιμότητά του είναι γεωχημικής και όχι βιολογικής φύσης [Chapin et al., 2011].



Σχήμα 1.9. Συνδυασμένος κύκλος C-N-P [<https://www.eea.europa.eu/el/simata-eop-2010/simata-2019/grafikes-plirofories/o-kyklos-ton-threptikon-stoicheion/view>]

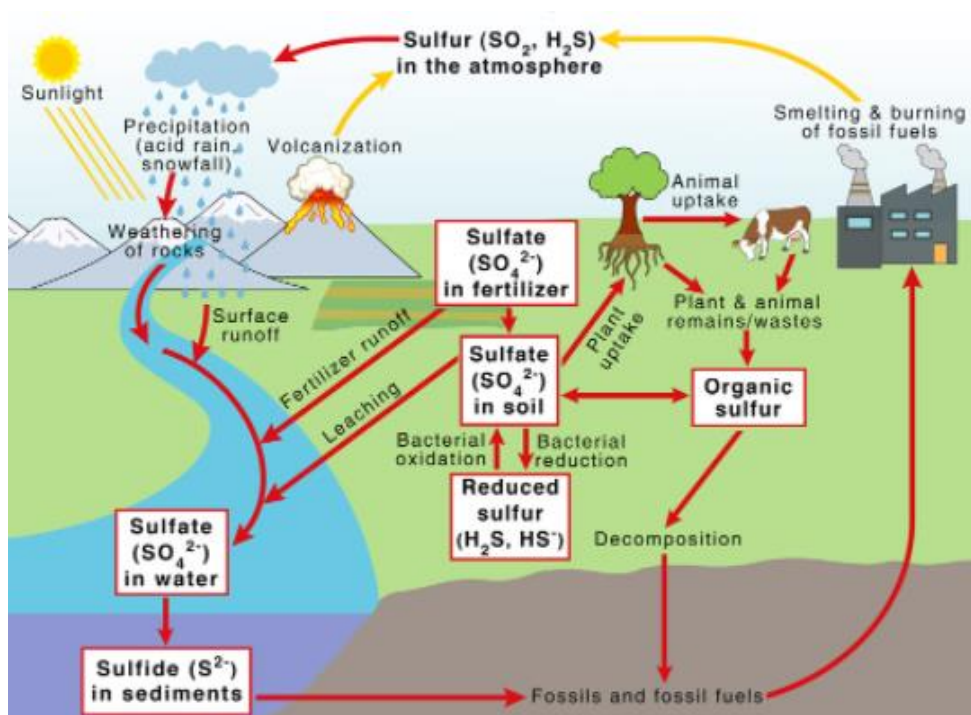
#### 1.2.5. Κυκλοφορία θείου σ' ένα οικοσύστημα

Ο κύκλος του θείου (S) είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τους κύκλους του αζώτου και του φωσφόρου. Αυτό συμβαίνει διότι το θείο είναι απαραίτητο συστατικό των πρωτεϊνών και συγκεκριμένα, των αμινοξέων που αποτελούν τα δομικά στοιχεία τους. Αντίστοιχα, η αναγκαιότητα του αζώτου και του φωσφόρου έγκειται στο γεγονός ότι παράγουν ιστούς όπως φύλλα και ρίζες [Chapin et al., 2011].

Το μεγαλύτερο ποσό θείου στη Γη βρίσκεται στα ορυκτά πετρώματα και σε ωκεανούς υπό μορφή ωκεάνιων ιζημάτων. Επίσης, αρκετή ποσότητα θείου συναντάται στην ατμόσφαιρα από φυσικές και ανθρωπογενείς πηγές. Φυσικές πηγές θείου αποτελούν



η ηφαιστειακή δραστηριότητα, οι διεργασίες βακτηρίων και η αποσύνθεση οργανισμών, ενώ ανθρωπογενείς πηγές αποτελούν οι βιομηχανίες (καύσεις) που εκπέμπουν διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) και υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Το διοξείδιο του θείου ( $\text{SO}_2$ ) αντιδρώντας με το νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ) παράγει θειϊκό οξύ ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) και το θείο της ατμόσφαιρας αντιδρά με το οξυγόνο παράγοντας θειϊκά άλατα. Μέσω της κατακρήμνισης τα θειϊκά άλατα εναποτίθενται στο έδαφος και μεταφέρονται στα ύδατα [Lennitech]. Για τους οργανισμούς, τα θειϊκά άλατα που βρίσκονται στο νερό αποτελούν την κύρια πηγή θείου. Το θείο που διαλύεται στο νερό απορροφάται από τα φυτά τα οποία παράγουν πρωτεΐνες. Τα φυτοφάγα ζώα τρέφονται από τα φυτά και έτσι προσλαμβάνουν θείο για να συντηρηθούν. Κατά την αποσύνθεση των περιττωμάτων τους ή των ιδίων από ειδικά βακτήρια παράγεται υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (Σχ.1.10) [Χατζημήτρος, 2014].



Σχήμα 1.10. Ποές θείου [<https://www.sciencefacts.net/sulfur-cycle.html>]

### 1.3. Διαδικασίες εδαφών

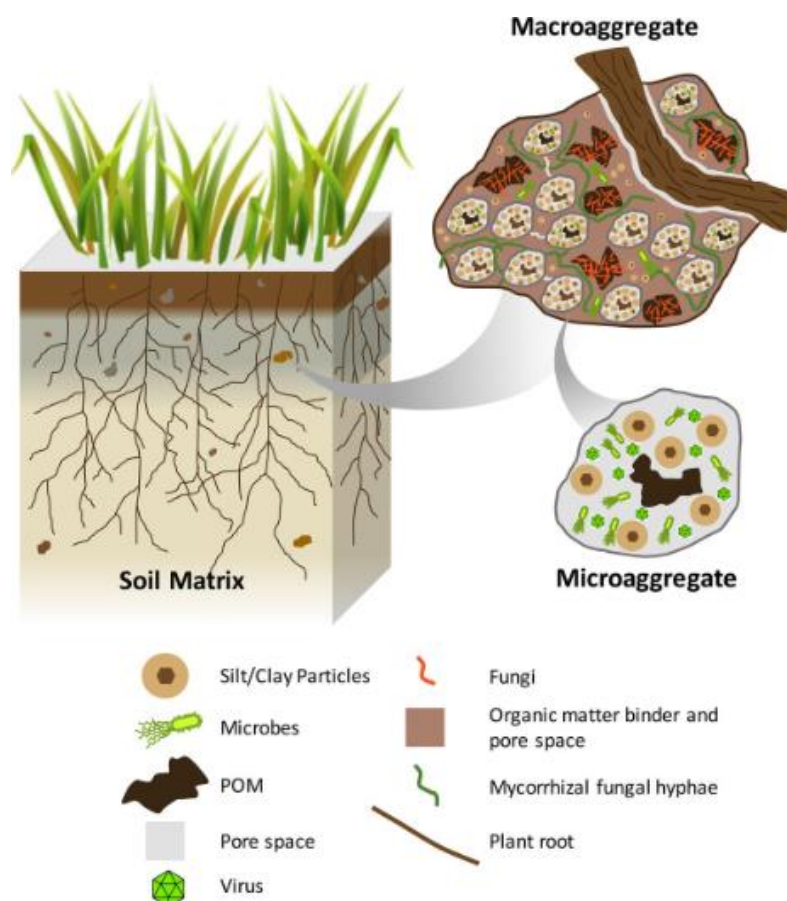
#### 1.3.1. Συσσωμάτωση

Όπως προαναφέρθηκε, η εδαφική δομή αποτελεί παράγοντα της λειτουργίας του εδάφους, της ικανότητάς του να υποστηρίζει την ύπαρξη φυτών και ζώων, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στη δέσμευση άνθρακα (C) και στην ποιότητα νερού. Δείκτης της εδαφικής δομής αποτελεί η σταθερότητα των συσσωματωμάτων, η οποία βελτιώνει τη γονιμότητα του εδάφους, ενισχύει το πορώδες, ελαττώνει τα φαινόμενα διάβρωσης και εντείνει την παραγωγικότητα.

Συσσωμάτωση (aggregation) ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία αναδιατάσσονται, κροκιδώνονται και τσιμεντοποιούνται σωματίδια του εδάφους δημιουργώντας δευτερογενή σωματίδια που ονομάζονται συσσωματώματα (aggregates). Πυρήνας σχηματισμού των συσσωματωμάτων αποτελεί ο εδαφικός

οργανικός άνθρακας (SOC, Soil Organic Carbon), ο οποίος δρα ως συνδετικός κρίκος μεταξύ οργανικών, ανόργανων ουσιών και ορυκτών (Σχ. 1.11). Η συσσωμάτωση επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων όπως το περιβάλλον, τη διαχείριση του εδάφους, την σύνθεση ορυκτών, την μικροβιακή δραστηριότητα, τα αποθέματα θρεπτικών συστατικών, την επίδραση των φυτών και το διαθέσιμο ποσό ύδατος [Bronick, Lal, 2005]. Ειδικότερα, τα φυτικά υπολείμματα και ο βαθμός αποσύνθεσης της εδαφικής οργανικής ύλης (SOM, Soil Organic Matter) είναι παράγοντες που επηρεάζουν τον σχηματισμό και την σταθεροποίηση της δομής των συσσωματωμάτων για τη δέσμευση του SOC. Επίσης, η πανίδα, η χλωρίδα και τα υπολείμματα αυτών είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τη διαδικασία της συσσωμάτωσης, καθώς τα φυτά ενισχύουν το έδαφος με νέα υπολείμματα και ρίζες, τα οποία συνιστούν τον συγκολλητικό παράγοντα μεταξύ των σωματιδίων. Με την αποικοδόμηση του SOM τα οργανικά σωματίδια ενώνονται με την μήτρα του εδάφους και σχηματίζουν διαφόρου μεγέθους συσσωματώματα [Blanco-Canqui, Lal, 2010]. Τα συσσωματώματα βάσει μεγέθους διακρίνονται στα μακρο-συσσωματώματα (macro-aggregates) με μέγεθος 250-2,000μm, στα μικρο-συσσωματώματα (micro-aggregates) μεγέθους 53-250μm και στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου (silt-clay aggregates) με μέγεθος <53μm [Stamati et al., 2013].

Οι παράγοντες που είναι υπεύθυνοι για την σταθεροποίηση και τη διάταξη των συσσωματωμάτων διακρίνονται σε προσωρινούς, παροδικούς και ισχυρούς. Οι προσωρινοί παράγοντες περιλαμβάνουν ρίζες φυτών, υφές μυκορριζών και μυκήτων, κύτταρα βακτηρίων και άλγη, τα οποία αναπτύσσονται παράλληλα με το ριζικό σύστημα των φυτών δημιουργώντας έναν οργανικό σκελετό που ενώνεται με ορυκτά σχηματίζοντας τα μακρο-συσσωματώματα. Οι παροδικοί παράγοντες περιλαμβάνουν πολυσακχαρίτες και οργανικές ουσίες υπό μορφή βλέννας. Οι πολυσακχαρίτες προέρχονται από ιστούς φυτών και ζώων, εκκρίματα ριζών, βακτήρια και υφές μυκήτων και αποτελούν το 25% του χούμου. Δεσμεύουν συσσωματώματα μεγέθους 10-50μm τα οποία αλληλεπιδρούν με αργιλικά σωματίδια ενισχύοντας τους δεσμούς μεταξύ τους. Η σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων διαρκεί κάποιες εβδομάδες λόγω της ευκολίας αποσύνθεσης των πολυσακχαριτών. Οι ισχυροί παράγοντες περιλαμβάνουν χουμικές ενώσεις, που υποστηρίζουν τις διαδικασίες της συσσωμάτωσης και της μακροχρόνιας δέσμευσης SOC καθώς βρίσκονται εντός των μικρο-συσσωματωμάτων σχηματίζοντας ανθεκτικά σύμπλοκα με αργιλικά σωματίδια [Blanco-Canqui, Lal, 2010].



Σχήμα 1.11. Εδαφικά συσσωματώματα [Wilpiszeski et al., 2019]

#### i) Υδατοσταθερά συσσωματώματα

Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων στην επίδραση του νερού (WSA, Water Stable Aggregates) αποτελεί χαρακτηριστικό των εδαφών, εξαρτάται από τα οργανικά υλικά και συγκεκριμένα, από τους ισχυρούς παράγοντες. Η ανάπτυξη των καλλιεργειών επηρεάζεται από τη δομή του εδάφους, δηλαδή από την ύπαρξη συσσωματωμάτων με διάμετρο 1-10mm ( $10^3$ - $10^4\mu\text{m}$ ) που παραμένουν σταθερά υπό την παρουσία νερού. Τα κενά μεταξύ των συσσωματωμάτων είναι πορώδη και έτσι επιτρέπεται η διήθηση, η συγκράτηση του νερού για την ανάπτυξη των φυτών καθώς και η αποστράγγισή του. Σε περίπτωση που ένα ασταθές, ξηρό συσσωμάτωμα διαβραχεί, τότε αυτό διασπάται σε μικρότερα συσσωματώματα (slaking). Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται λόγω της μειωμένης αντοχής των συσσωματωμάτων στις πιέσεις του αέρα που βρίσκεται παγιδευμένος στους πόρους και εμφανίζεται σε επιφανειακά στρώματα του εδάφους τα οποία δεν προστατεύονται από την ξήρανση λόγω αέρα και τη διαβροχή.

Η σταθερότητα των συσσωματωμάτων στην επίδραση του νερού έχει συσχετιστεί πολλές φορές με την ποσότητα του οργανικού άνθρακα (OC, Organic Carbon), όμως στις πλείστες των περιπτώσεων οι συσχετίσεις μεταξύ τους δεν ήταν αληθείς. Αυτό συνέβη επειδή α) μόνο ένα μέρος της οργανικής ύλης είναι υπεύθυνο για την υδατοσταθερή συσσωμάτωση, β) υπάρχει μια ποσότητα οργανικού άνθρακα πάνω από την οποία δεν παρατηρείται βελτίωση της σταθερότητας των συσσωματωμάτων

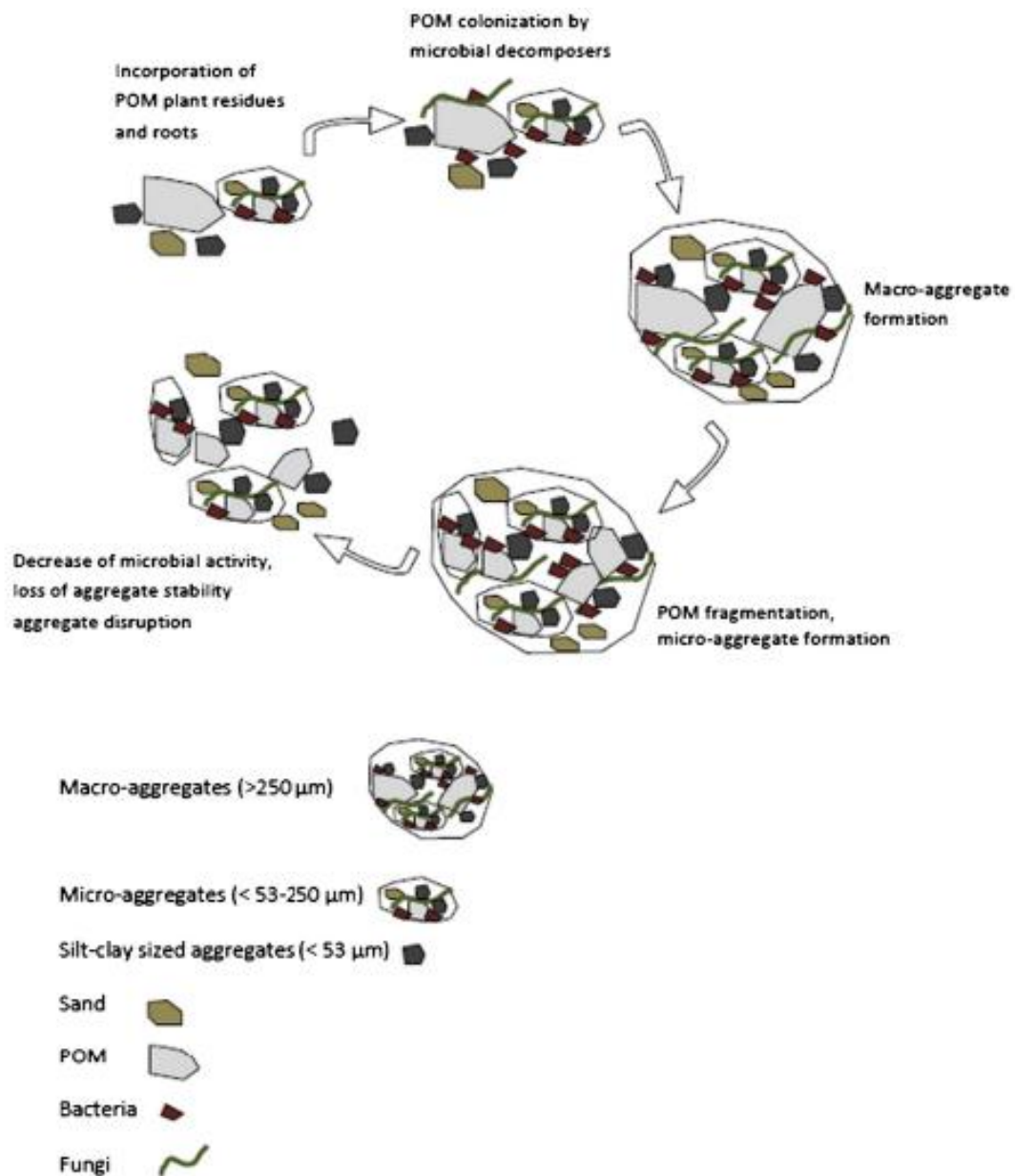


παρουσία ύδατος, γ) τα οργανικά υλικά δεν αποτελούν βασικούς παράγοντες, δ) η ποσότητα ή το είδος της οργανικής ύλης δεν είναι τόσο σπουδαία όσο η διάθεση της οργανικής ύλης για αποσύνθεση και ε) σε εδάφη που δεν έχουν υποστεί καμία διαχείριση, η σταθερότητα των συσσωματωμάτων εξαρτάται από φυσικούς παράγοντες. Η σταθερότητα των εδαφικών συσσωματωμάτων είναι προτιμότερο να συσχετίζεται με τα οργανικά υλικά απ' ό,τι με τον συνολικό οργανικό άνθρακα επειδή η οργανική ύλη αποτελεί το υπόστρωμα της μικροβιακής παραγωγής συγκολλητικών παραγόντων ("κόλλας") που αυξάνει τη σταθερότητα των συσσωματωμάτων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η διαχείριση των εδαφών μπορεί να αλλάξει την ποσότητα της οργανικής ύλης, άρα και την σταθερότητα των εδαφικών συσσωματωμάτων [Tisdall, Oades, 1982].

## ii) Μηχανισμοί συσσωμάτωσης

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί συσσωμάτωσης οι οποίοι έχουν παρουσιαστεί από επιστήμονες στην πάροδο του χρόνου. Ο Emerson (1959) υπέθεσε ότι οι οργανικές ουσίες χρησιμοποιώντας άμμο και άργιλο δημιουργούν και σταθεροποιούν τα εδαφικά συσσωματώματα. Επίσης, θεώρησε ότι το ποσό του οργανικού άνθρακα που αποθηκεύεται στα συσσωματώματα είναι ανάλογο της ειδικής επιφάνειας των αργιλικών ορυκτών. Ο Greenland (1965) υποστήριξε ότι ο σχηματισμός και η σταθεροποίηση των συσσωματωμάτων επιτυγχάνεται μέσω των πολυσακχαριτών που παράγονται από τα υπολείμματα φυτών και η δράση τους εξαρτάται από τα εδαφικά χαρακτηριστικά. Οι Edwards και Bremner (1967) δήλωσαν ότι ο σχηματισμός των μακρο-συσσωματωμάτων είναι απόρροια της σύνδεσης μικρο-συσσωματωμάτων, δηλαδή δομών οργανικών-ορυκτών συμπλόκων. Οι Tisdall και Oades (1982) παρουσίασαν ένα ιεραρχικό μοντέλο συσσωμάτωσης, στο οποίο η SOM αποτελεί τον βασικό παράγοντα σχηματισμού συσσωματωμάτων. Υποστήριξαν ότι τα μακρο-συσσωματώματα σχηματίζονται λόγω της σύνδεσης μικρο-συσσωματωμάτων και πρωτογενών σωματιδίων και πρότειναν τέσσερα στάδια συσσωμάτωσης. Αρχικά, μικρο-συσσωματώματα μεγέθους  $<2\mu\text{m}$  συνδέονται μέσω των φορτίων των οργανικών σωματιδίων και μικρο-συσσωματώματα μεγέθους  $2-20\mu\text{m}$  ενώνονται μεταξύ τους με ισχυρούς παράγοντες. Στην συνέχεια, μικρο-συσσωματώματα μεγέθους  $20-250\mu\text{m}$  σχηματίζονται μέσω συσχέτισης αργιλοπυριτικών αλάτων με παροδικούς και ισχυρούς παράγοντες. Τέλος, τα μικρο-συσσωματώματα συνδέονται με προσωρινούς παράγοντες (ρίζες, υφές μυκήτων) σε εδάφη με  $\text{SOM} > 2\%$  ενώ σε εδάφη με  $\text{SOM} < 2\%$  συνδέονται με παροδικούς παράγοντες σχηματίζοντας τα μακρο-συσσωματώματα ( $>250\mu\text{m}$ ). Ο Oades (1984) τροποποίησε το ιεραρχικό μοντέλο συσσωμάτωσης, δείχνοντας ότι τα μικρο-συσσωματώματα σχηματίζονται εντός των μακρο-συσσωματωμάτων. Οι Golchin et al. (1998) δήλωσαν ότι τα μακρο-συσσωματώματα διασπώνται σε μεσαία μικρο-συσσωματώματα ( $<250\mu\text{m}$ ) και κατόπιν, σε μικρά μικρο-συσσωματώματα ( $<20\mu\text{m}$ ). Επίσης, εξέφρασαν την σημαντικότητα της σωματιδιακής οργανικής ύλης (POM) για τη συσσωμάτωση καθώς αποτελείται από οργανικά υπολείμματα διαφόρων σταδίων αποικοδόμησης ( $10-20\%$  SOM). Οι Six et al. (1999) παρουσίασαν τέσσερα στάδια διαδικασιών των μακρο-συσσωματωμάτων, σχηματισμού των μικρο-συσσωματωμάτων και σταθεροποίησης του εδαφικού οργανικού άνθρακα (SOC) σε μικρο-συσσωματώματα. Δήλωσαν ότι η σταθεροποίηση των μακρο-συσσωματωμάτων διευκολύνεται από τα φυτικά υπολείμματα, τις ρίζες και την POM (Σχ.1.12). Έτσι, μικρο-συσσωματώματα σχηματίζονται μέσα σε μακρο-συσσωματώματα, τα οποία είναι επιστρωμένα με λεπτά

οργανικά σωματίδια. Τέλος, η αποσύνθεση των μακρο-συσσωματωμάτων απελευθερώνει μικρο-συσσωματώματα πλούσια σε SOC [Blanco-Canqui, Lal, 2010].



Σχήμα 1.12. Μοντέλο Συσσωμάτωσης [Stamati et al., 2013]

### 1.3.2. Μεταφορά νερού και θρεπτικών συστατικών στα φυτά

Η μετακίνηση του νερού και των θρεπτικών συστατικών από το έδαφος στα φυτά επιτυγχάνεται μέσω του ριζικού συστήματος των φυτών. Οι ρίζες απορροφούν τα απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών συστατικά με τρεις μηχανισμούς: α) μέσω της διάχυσης (diffusion), β) μέσω της μαζικής ροής (mass flow) και γ) μέσω της ανάπτυξης ριζών (root interception) (Σχ.1.13). Οι ρίζες προσλαμβάνουν μόνο τα θρεπτικά συστατικά που είναι σε επαφή με τα ριζικά κύτταρα και επειδή οι ρίζες

αποτελούν ένα ποσοστό όγκου της τάξης του 1% τα διαλυμένα θρεπτικά μετακινούνται απ' το χώμα στην ριζική επιφάνεια για να επέλθει η απορρόφησή τους [Chapin et al., 2011].

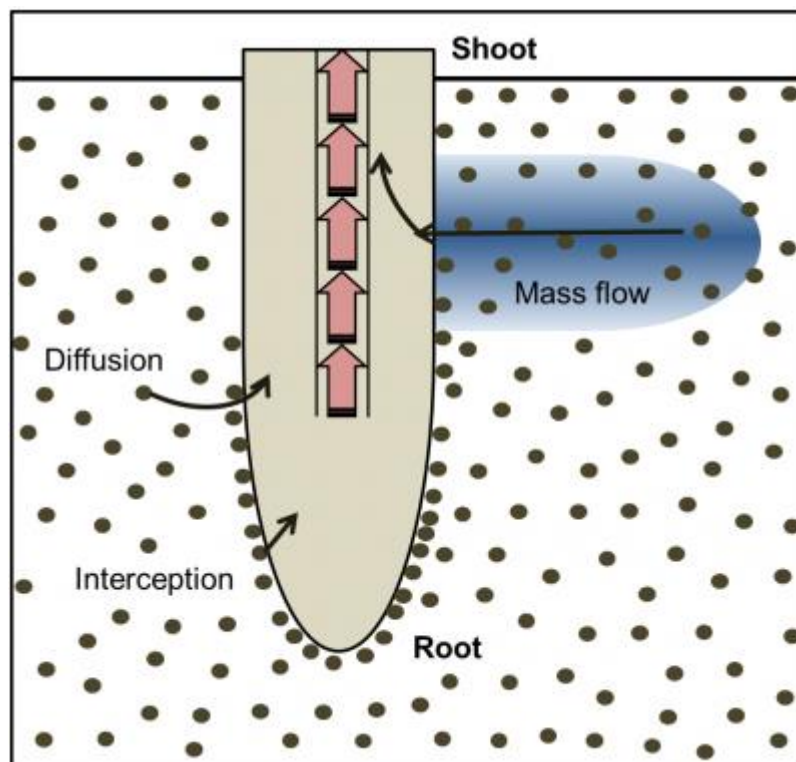
#### **i) Μηχανισμοί μεταφοράς**

Ο μηχανισμός που προσφέρει τα περισσότερα θρεπτικά συστατικά στα φυτά είναι η διάχυση. Η διάχυση είναι η κίνηση ιόντων ή μορίων λόγω διαφοράς συγκέντρωσης. Οι κινητήριες δυνάμεις της διάχυσης στην ριζική επιφάνεια είναι η ανοργανοποίηση και η απορρόφηση των θρεπτικών συστατικών. Η απορρόφηση ελαττώνει την συγκέντρωση των θρεπτικών στην ριζική επιφάνεια ενώ η ανοργανοποίηση την αυξάνει σε σημεία εκτός της επιφάνειας της ρίζας. Η ανοργανοποίηση και άλλες εισροές θρεπτικών ουσιών ελέγχουν το διαθέσιμο ποσό των θρεπτικών ουσιών για διάχυση. Εκτός των εισροών και της ανοργανοποίησης θρεπτικών, η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (CEC, Cation Exchange Capacity) επηρεάζει την ποσότητα των διαθέσιμων θρεπτικών ουσιών για διάχυση καθώς και του εδαφικού όγκου που εκμεταλλεύεται η ρίζα. Εδάφη που διέπονται από υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων αποθηκεύουν πιο πολλά κατιόντα ανά μονάδα εδαφικού όγκου αλλά αργούν σημαντικά την μεταφορά θρεπτικών ουσιών στην ριζική επιφάνεια που πραγματοποιείται μέσω αντιδράσεων ανταλλαγής. Οι αντιδράσεις ανταλλαγής έχουν ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση κατιόντων από το διάλυμα του εδάφους σε περιπτώσεις υψηλών συγκεντρώσεων και την αποκατάσταση κατιόντων σε περιπτώσεις χαμηλών συγκεντρώσεων. Με αυτό τον τρόπο, η ρίζα απορροφά περισσότερα θρεπτικά συστατικά απ' όσα βρίσκονται στην πραγματικότητα στο εδαφικό διάλυμα. Το μήκος της διαδρομής διάχυσης εξαρτάται από το μέγεθος των εδαφικών σωματιδίων και την εδαφική υγρασία. Όσο μεγαλύτερη είναι η υγρασία και όσο μικρότερο το σωματίδιο, τόσο πιο απευθείας είναι η διαδρομή από το χώμα στην ριζική επιφάνεια. Η διάχυση, δηλαδή, πραγματοποιείται γρηγορότερα σε κορεσμένα και αργιλώδη εδάφη και με πιο αργό ρυθμό σε ακόρεστα και αμμώδη εδάφη.

Ένας άλλος μηχανισμός μεταφοράς θρεπτικών συστατικών είναι η μαζική ροή. Μαζική ροή είναι 1) η μετακίνηση διαλυτών θρεπτικών ουσιών προς την ριζική επιφάνεια μέσω του νερού και 2) ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για την αύξηση παροχής των ιόντων που είναι διαθέσιμα λόγω διάχυσης. Η μαζική ροή του διαλύματος του εδάφους προς τη ρίζα προκαλείται από τη διαδικασία της διαπνοής των φυτών κατά την οποία διαφεύγει νερό. Η μαζική ροή μπορεί να παρέχει συστατικά τα οποία βρίσκονται σε αφθονία στο διάλυμα του εδάφους (π.χ. Ca) ή να παρέχει ουσίες που τα φυτά έχουν ανάγκη σε μικρές ποσότητες (μικροθρεπτικά συστατικά). Η ροή μάζας δεν είναι ο κατάλληλος μηχανισμός για την παροχή θρεπτικών συστατικών που είναι αναγκαία από τα φυτά σε υψηλές ποσότητες αλλά βρίσκονται σε χαμηλές συγκεντρώσεις στο διάλυμα του εδάφους. Τέτοια θρεπτικά συστατικά ονομάζονται μακροθρεπτικά και αποτελούν το άζωτο (N), ο φώσφορος (P), το κάλιο (K) κ.α. τα οποία παρέχονται μέσω του μηχανισμού της διάχυσης.

Ο τρίτος μηχανισμός μετακίνησης θρεπτικών ουσιών είναι η ανάπτυξη ριζών. Η ανάπτυξη ριζών δεν αποτελεί βασικό μηχανισμό παροχής θρεπτικών ουσιών στις ρίζες των φυτών όμως είναι κρίσιμη καθώς δημιουργεί ρίζες στις οποίες απορροφούνται θρεπτικές ουσίες μέσω των άλλων δυο μηχανισμών, δηλαδή της διάχυσης και της μαζικής ροής. Κατά την ανάπτυξη ριζών, οι ρίζες μετακινούνται προς το θρεπτικό συστατικό όμως, οι συγκεντρώσεις N, P, K είναι χαμηλές σε σχέση με το

ποσό θρεπτικών συστατικών που χρειάζονται για ανάπτυξη ριζών, άρα, ο μηχανισμός αυτός είναι αμελητέος ως προς την παροχή θρεπτικών ουσιών στη ρίζα [Chapin et al., 2011].



Σχήμα 1.13. Μηχανισμοί μεταφοράς θρεπτικών συστατικών στις ρίζες των φυτών [Brundrett et al., 2010]

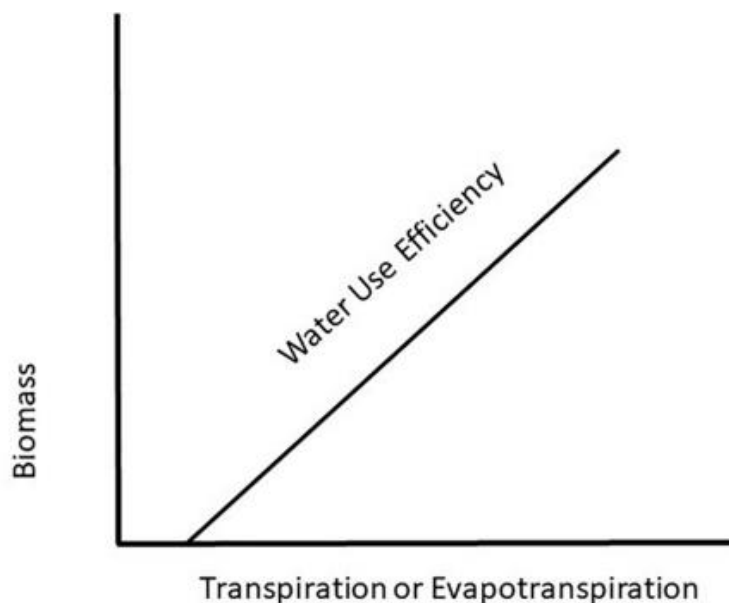
## ii) Παράγοντες απορρόφησης

Οι παράγοντες ελέγχου της απορρόφησης θρεπτικών συστατικών από τις ρίζες είναι: 1) ο ρυθμός με τον οποίο παρέχονται οι θρεπτικές ουσίες από το χώμα, 2) το μήκος της ρίζας και 3) η δραστηριότητα της ρίζας ανά μονάδα ρίζας. Ο παράγοντας που επηρεάζει τις διαφορετικές απορροφήσεις μεταξύ οικοσυστημάτων είναι ο ρυθμός παροχής θρεπτικών. Τα χαρακτηριστικά των φυτών και συγκεκριμένα, το μήκος, το βάθος και η δραστηριότητα της ρίζας αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες της απορρόφησης θρεπτικών ουσιών. Αυτό συμβαίνει σε καταστάσεις στις οποίες ο ρυθμός παροχής θρεπτικών είναι μεγαλύτερος από τις ανάγκες των φυτών ή σε περιπτώσεις όπου τα φυτά έχουν πρόσβαση σε δεξαμενές θρεπτικών του εδάφους οι οποίες είναι απροσπέλαστες. Έτσι, με την πάροδο του χρόνου τα φυτά αναπτύσσονται σε τοποθεσίες που ευνοούν την απορρόφηση των αναγκαίων για αυτών συστατικών, πάντα σύμφωνα με την παροχή του εδάφους. Το μήκος της ρίζας καθορίζει ποια φυτά του οικοσυστήματος είναι ικανά ανταγωνισμού όσον αφορά την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών. Πιο συγκεκριμένα, το μήκος της ρίζας ελέγχει την απορρόφηση θρεπτικών και NPP σε περιπτώσεις υψηλής γονιμότητας ή ανάκαμψης της βλάστησης από διαταραχές. Επομένως, η αύξηση του μήκους της ρίζας του φυτού ανά μονάδα μάζας (SRL, Specific Root Length) είναι η οδός εξερεύνησης του φυτού στο έδαφος που επιφέρει υψηλότερη δέσμευση θρεπτικών συστατικών από το φυτό [Chapin et al., 2011].

### iii) Αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE)

Γενικότερα, η χρήση του νερού από τα φυτά επηρεάζεται από την κλιματική αλλαγή και ειδικότερα, από την απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, τις υψηλές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub>, τη διακύμανση της υγρασίας και της βροχόπτωσης. Η έννοια της αποδοτικότητας χρήσης νερού (WUE, Water Use Efficiency) πρωτοεμφανίστηκε από τους Briggs και Shantz (1913) και συνδέει άρρηκτα τη χρήση του νερού με τη φυτική παραγωγή [Hatfield, Dold, 2019]. Πιο συγκεκριμένα, η αποδοτικότητα χρήσης νερού ορίζεται ως ο ρυθμός παραγωγής βιομάζας, δηλαδή η εισροή άνθρακα μέσω της φωτοσύνθεσης (GPP, Gross Primary Production) προς τον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής των φυτών (ET, Evapotranspiration), δηλαδή του νερού που εξέρχεται μέσω εξάτμισης και διαπνοής (Σχ.1.14) [Hatfield, Dold, 2019, Steduto, 1996].

$$WUE = \frac{GPP}{ET}$$



Σχήμα 1.14. WUE συναρτήσει βιομάζας και εξατμισοδιαπνοής (γενικευμένη σχέση) [Hatfield, Dold, 2019]

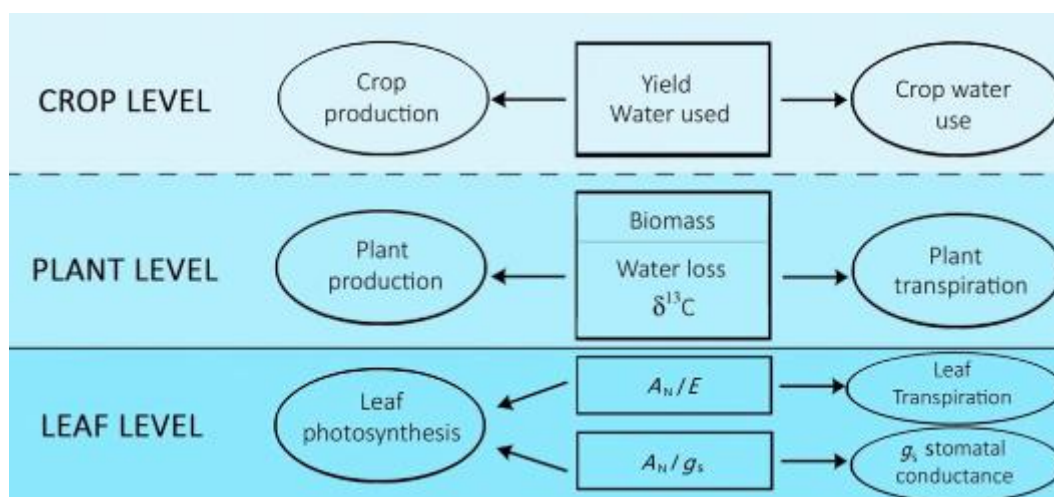
Η αποδοτικότητα χρήσης νερού μπορεί να μελετηθεί σε επίπεδο φύλλου, φυτού και συγκομιδής (Σχ.1.15). Οι επιπτώσεις της αποδοτικότητας χρήσης νερού ποικίλλουν ανάλογα με τη χρονική και τη χωρική κλίμακα. Ειδικότερα, υπάρχει η φωτοσυνθετική αποδοτικότητα χρήσης νερού στην οποία η χρονική κλίμακα είναι λεπτά ή ώρες και τη χωρική κλίμακα αποτελεί το φύλλο ή το φυτό. Εκτός από την φωτοσυνθετική αποδοτικότητα χρήσης νερού υπάρχει και η αποδοτικότητα χρήσης νερού βιομάζας με χρονική κλίμακα την ημέρα ή την εποχή και χωρική κλίμακα το φυτό ή την καλλιέργεια. Τέλος, κατά την αποδοτικότητα χρήσης νερού απόδοσης παραγωγής (συγκομιδής), χρονική κλίμακα αποτελεί η εποχή και χωρική κλίμακα ο θόλος των φυτών [Steduto, 1996].

Η αποδοτικότητα χρήσης νερού σε επίπεδο φύλλου μπορεί να βρεθεί υπολογίζοντας τον καθαρό ρυθμό φωτοσύνθεσης ( $A_n$ ) ο οποίος διαιρείται με τον ρυθμό με το οποίο

πραγματοποιείται η διαδικασία της διαπνοής (E). Επίσης, μπορεί να βρεθεί η εγγενής αποδοτικότητα χρήσης νερού σε επίπεδο φύλλου η οποία ορίζεται ως ο καθαρός φωτοσυνθετικός ρυθμός ( $A_n$ ) διαιρούμενος με την αγωγιμότητα των στοματίων ( $g_s$ ) (Σχ.1.14). Η απόκριση της αποδοτικότητας χρήσης νερού σε φυλλικό επίπεδο εξαρτάται από τις διεργασίες μεταβολής των  $CO_2$  και  $H_2O$ . Αύξηση του  $CO_2$  προκαλεί αύξηση στην αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE) λόγω του υψηλού φωτοσυνθετικού ρυθμού ( $A_n$ ) και της μειωμένης στοματικής αγωγιμότητας ( $g_s$ ). Έτσι, η αποδοτικότητα χρήσης νερού αρχίζει να αυξάνεται μέχρι την έκθεση των φύλλων σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες της βέλτιστης παραγωγικότητας (θερμική καταπόνηση) και κατόπιν, μειώνεται.

Σε επίπεδο θόλου η σχέση μεταξύ αποδοτικότητας χρήσης νερού και κλιματικών μεταβολών δεν είναι τόσο άμεση. Αυτό συμβαίνει λόγω της εξάρτησής της από την ανταπόκριση ανάπτυξης συγκεκριμένων ειδών σε αλλαγές της θερμοκρασίας και από τη διαχείριση του νερού από τον θόλο του φυτού. Σε αυτή την περίπτωση, ο υπολογισμός της αποδοτικότητας χρήσης νερού πραγματοποιείται μέσω της ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγής (GPP) διαιρούμενη με την εξατμισοδιαπνοή (ET). Με αυτόν τον τρόπο εισάγεται η ανταλλαγή  $CO_2$  και  $H_2O$  στην εδαφική επιφάνεια και στο θόλο του φυτού. Επιπροσθέτως, υπάρχει και η εγγενής αποδοτικότητα χρήσης νερού σε επίπεδο θόλου (IWUE, Inherent Water Use Efficiency) η οποία υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το έλλειμμα πίεσης ατμού (VPD, Vapor Pressure Deficit) με την αποδοτικότητα χρήσης νερού του θόλου του φυτού. Οι πρακτικές διαχείρισης υπολειμμάτων βιομάζας, η εδαφοκάλυψη (mulching) και η άρδευση βελτιώνουν την αποδοτικότητα χρήσης νερού ελαττώνοντας την εξάτμιση και αυξάνοντας τη διαπνοή.

Τέλος, σε επίπεδο συγκομιδής η αποδοτικότητα χρήσης νερού ορίζεται ως η απόδοση της παραγωγής βιομάζας προς το νερό που χρησιμοποιείται [Hatfield, Dold, 2019].



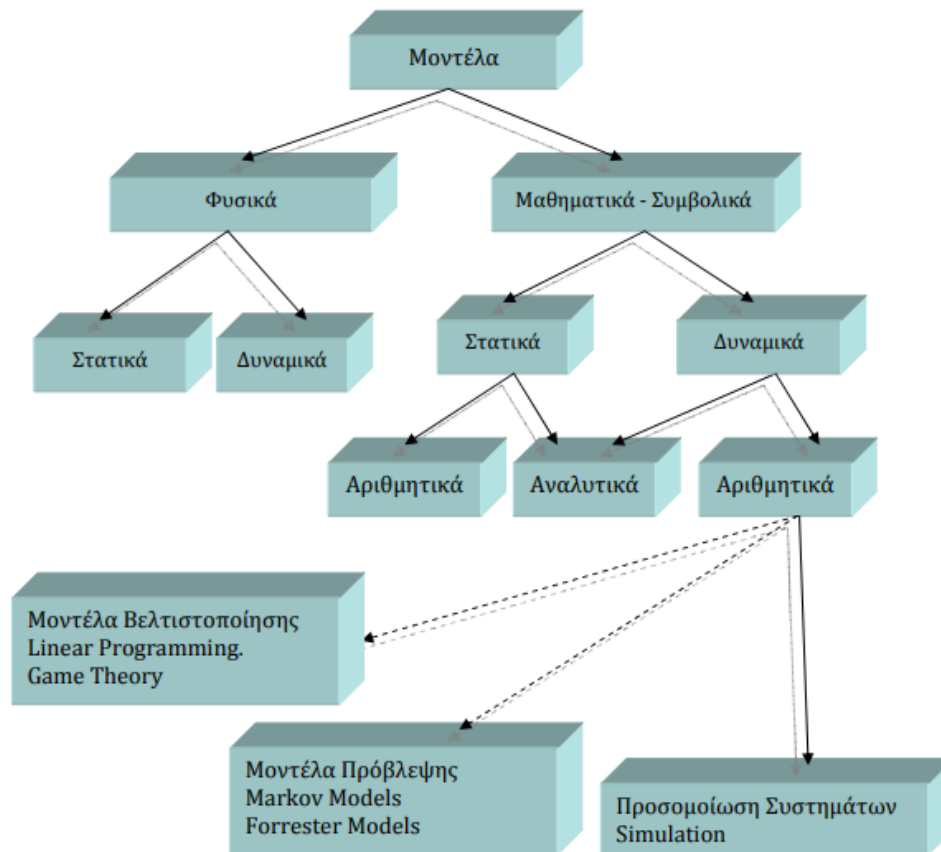
Σχήμα 1.15. Επίπεδα μέτρησης WUE [Medrano et al., 2015]

#### **1.4. Μοντελοποίηση**

##### **1.4.1. Κατηγορίες μοντέλων**

Γενικά, μοντέλο ονομάζεται το εργαλείο αναπαράστασης ενός φυσικού συστήματος ή φαινομένου, ενός οργανισμού ή μιας ιδέας. Είναι οι πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί με απώτερο στόχο την πρόβλεψη, την μελέτη και την βελτιστοποίηση ενός συστήματος. Το μοντέλο θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικό του συστήματος που μελετάται, δηλαδή τα συμπεράσματα που προκύπτουν θα πρέπει να αντιστοιχούν στα συμπεράσματα του συστήματος. Η ανάγκη κατασκευής μοντέλων είναι μεγάλη καθώς τα μοντέλα διευκολύνουν την κατανόηση και την επικοινωνία, προβλέπουν μελλοντικές συμπεριφορές και κάνουν εφικτή την μελέτη ενός συστήματος χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τους μελετητές, τους εκπαιδευόμενους και το ίδιο το σύστημα. Επίσης, διορθώνουν σχεδιαστικά σφάλματα βοηθώντας τον σχεδιασμό του συστήματος, βρίσκουν εναλλακτικές και τέλος, μέσω της μελέτης τους εξακριβώνεται ο αποδοτικότερος συνδυασμός παραμέτρων ο οποίος εφαρμόζεται στο σύστημα ενισχύοντας την απόδοση του πραγματικού συστήματος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μοντέλων (Σχ.1.16). Μια πρώτη κατηγοριοποίηση γίνεται σύμφωνα με τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Προσδιορισμένα ή καθορισμένα μοντέλα είναι τα μοντέλα στα οποία οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών είναι προσδιορισμένες και δεν εξαρτώνται από τυχαίους παράγοντες. Αντίθετα, στοχαστικά είναι τα μοντέλα των οποίων οι σχέσεις μεταξύ παραμέτρων είναι απροσδιόριστες, μεταβάλλονται τυχαία και σχετίζονται με πιθανότητες. Επιπλέον, τα μοντέλα συστημάτων διακρίνονται σε φυσικά και μαθηματικά. Τα μαθηματικά μοντέλα κάνουν χρήση μαθηματικών σχέσεων στην περιγραφή φυσικών ιδιοτήτων, διεργασιών και σχέσεων μεταξύ παραμέτρων του συστήματος. Με την σειρά τους, τα μαθηματικά μοντέλα διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά, τα οποία διακρίνονται σε αριθμητικά και αναλυτικά. Τα αριθμητικά μοντέλα είναι τα μοντέλα που βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις ενώ τα αναλυτικά μοντέλα περιγράφονται από πλήθος πλήρων εξισώσεων [Λουκής, 2010].



Σχήμα 1.16. Ταξινόμηση μοντέλων [Λουκής, 2010]

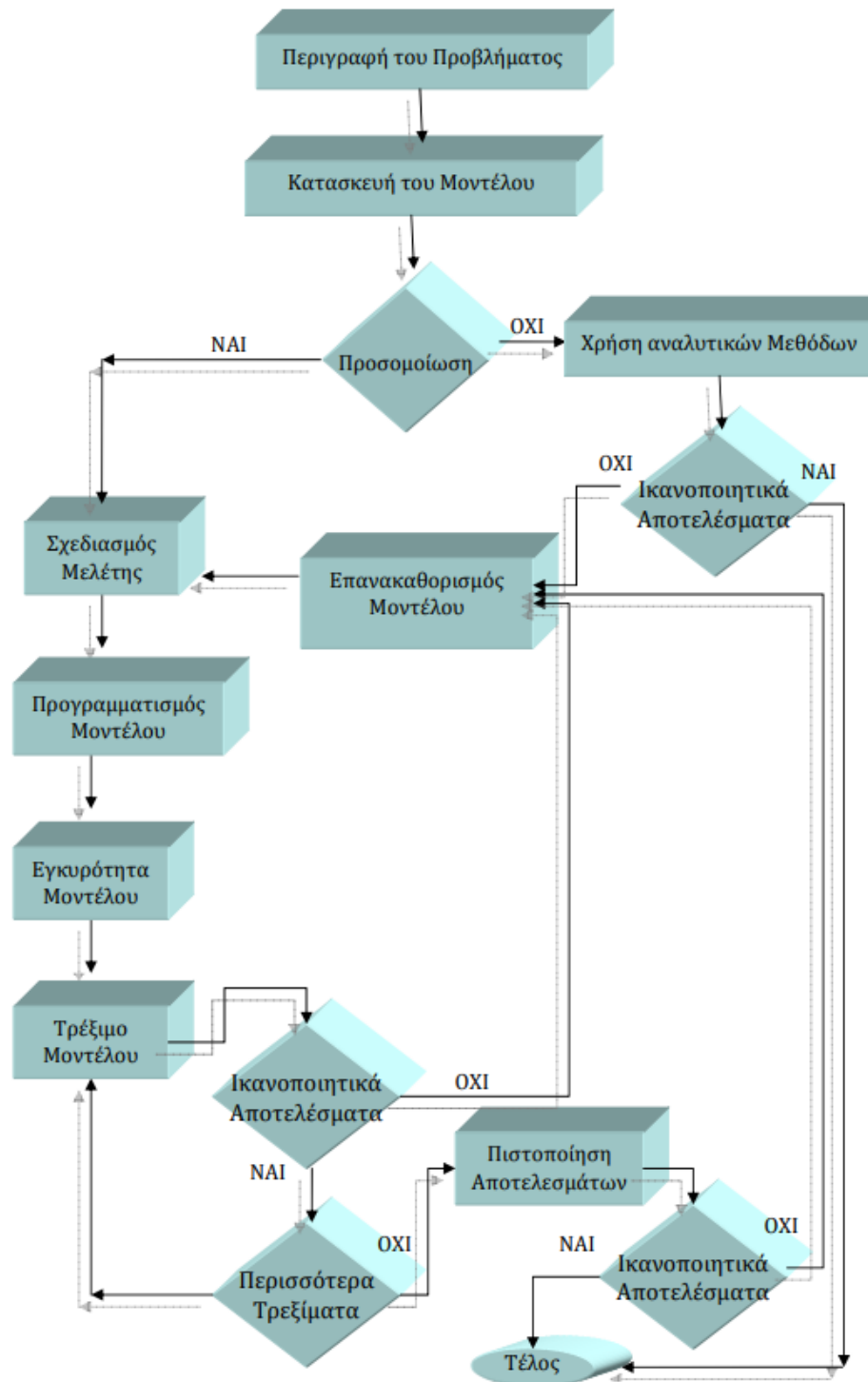
#### 1.4.2. Προσομοίωση

Η προσομοίωση (simulation) είναι μια μέθοδος μελέτης και ανάλυσης συστημάτων με σημαντικά πλεονεκτήματα. Προσομοίωση ορίζεται ως η αναπαράσταση μιας διεργασίας μέσω ενός μοντέλου με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ένα μοντέλο προσομοίωσης μιμείται τις λειτουργίες του συστήματος που μελετάται και προβλέπει τις μελλοντικές εξελίξεις των διεργασιών. Η διαδικασία της προσομοίωσης έχει τρεις βασικές φάσεις: α) την κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης, β) το τρέξιμο του μοντέλου προσομοίωσης και γ) την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα στάδια προσομοίωσης ενός συστήματος είναι (Σχ.1.17):

- 1) Περιγραφή προβλήματος
- 2) Κατασκευή μοντέλου προσομοίωσης
- 3) Καθορισμός συνθηκών πειράματος
- 4) Συλλογή δεδομένων και μετρήσεων
- 5) Προγραμματισμός μοντέλου προσομοίωσης
- 6) Επαλήθευση λειτουργίας μοντέλου
- 7) Έλεγχος εγκυρότητας, ακρίβειας, συσχέτισης
- 8) Εκτέλεση (τρέξιμο) μοντέλου
- 9) Ανάλυση αποτελεσμάτων
- 10) Διεξαγωγή συμπερασμάτων



Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι η σειρά των παραπάνω σταδίων προσομοίωσης δεν είναι προκαθορισμένη και στις πλείστες των περιπτώσεων δεν ακολουθείται. Για παράδειγμα, αν κατά τη διάρκεια του σχεδίου προσομοίωσης υπάρξουν λανθασμένες υποθέσεις, αυτές θα πρέπει να απορριφθούν, να επαναπροσδιοριστούν και να επανασχεδιαστεί το μοντέλο παρέχοντας αποτελέσματα που αντανακλούν την πραγματικότητα (Σχ.1.17) [Λουκής, 2010].



Σχήμα 1.17. Στάδια προσομοίωσης [Λουκής, 2010]

### 1.4.3. Μοντέλα διεργασιών εδάφους

Η μοντελοποίηση των φυσικών, χημικών και βιολογικών διεργασιών στο εδαφικό προφίλ είναι μια μέθοδος ποσοτικής ανάλυσης των ροών υλικών, ενέργειας και βιοποικιλότητας, τα οποία είναι σημαντικοί παράγοντες για την ορθή λειτουργία του εδάφους και την παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών. Οι βασικές προσκλήσεις της μοντελοποίησης των διεργασιών του εδάφους που εντοπίζονται είναι: α) ο συνδυασμός γνώσεων από διάφορες επιστήμες και η ενσωμάτωση των γνώσεων αυτών και β) η κατασκευή εδαφικών μοντέλων που θα μιμούνται τις φυσικοχημικές και βιολογικές διεργασίες που επιτελεί το έδαφος. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου υπήρξε πρόοδος στην ανάπτυξη μοντέλων που ξεπερνούν τα κενά γνώσης και ελαττώνουν την αβεβαιότητα στα αποτελέσματα [Banwart et al., 2019].

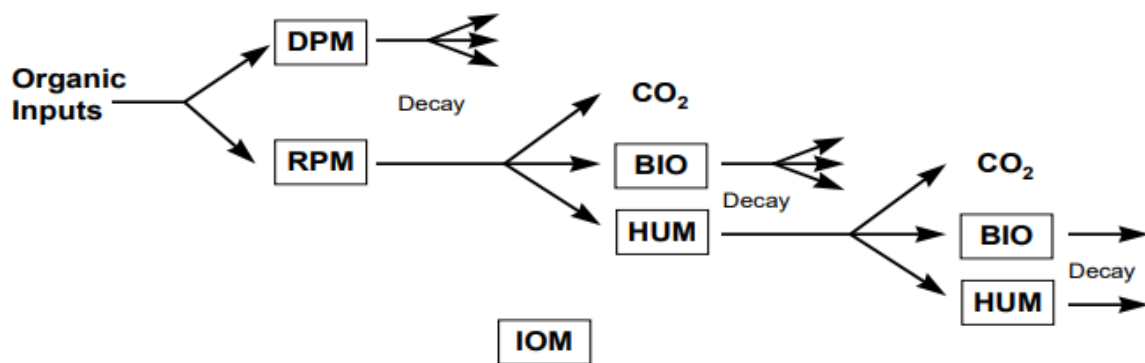
Η διεργασία που είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο του άνθρακα, των βιογεωχημικών κύκλων, των εδαφικών λειτουργιών και του τρόπου με τον οποίο ανταποκρίνεται το έδαφος στην κλιματική αλλαγή είναι η αποσύνθεση της εδαφικής οργανικής ύλης (SOM). Εκτός της αποσύνθεσης της SOM εξίσου σημαντική διεργασία αποτελεί η δέσμευση άνθρακα η οποία συνδυάζει την εδαφική δομή και τη δημιουργία συσσωματωμάτων με τις λειτουργίες του εδάφους [Banwart et al., 2019].

#### i) Μοντέλα RothC-26.3 και STRUC-C

Ένα μοντέλο το οποίο αποτέλεσε ακρογωνιαίο λίθο στη δημιουργία άλλων μοντέλων είναι το RothC-26.3. Το RothC-26.3 αναπτύχθηκε με απώτερο στόχο την μοντελοποίηση του οργανικού άνθρακα σε εδάφη μέσω πειραμάτων πεδίου του ινστιτούτου έρευνας Rothamsted, απ' όπου πήρε και το όνομά του. Είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης του οργανικού άνθρακα το οποίο έχει ως βασικές παραμέτρους το είδος του εδάφους, τη θερμοκρασία, την υγρασία και τη φυτοκάλυψη. Κάνει χρήση μηνιαίας χρονοσειράς και υπολογίζει τον συνολικό οργανικό άνθρακα σε  $t\ ha^{-1}$ , την μικροβιακή βιομάζα άνθρακα σε  $t\ ha^{-1}$  και την ηλικία των ραδιοϊσοτόπων του άνθρακα  $\Delta^{14}C$ . Οι υπολογισμοί των τριών αυτών μεγεθών γίνονται σε μια κλίμακα από λίγα χρόνια έως και μερικούς αιώνες. Σύμφωνα με το μοντέλο, ο οργανικός άνθρακας χωρίζεται στις παρακάτω μορφές (Σχ.1.18):

- Αποσυνθέσιμη φυτική ύλη (DPM, Decomposable Plant Material)
- Ανθεκτική στην αποσύνθεση φυτική ύλη (RPM, Resistant Plant Material)
- Μικροβιακή βιομάζα (BIO, Biomass)
- Χουμοποιημένη οργανική ύλη (HUM, Humified Organic Matter or Humus)
- Αδρανές οργανικό υλικό (IOM, Inert Organic Matter)

Τα DPM, RPM, BIO και HUM αποσυντίθενται μέσω κινητικής 1<sup>ης</sup> τάξης ενώ το IOM είναι ανθεκτικό στη διαδικασία της αποσύνθεσης (Σχ.1.18) [Coleman, Jenkinson, 2014].



Σχήμα 1.18. Δομή μοντέλου RothC-26.3 [Coleman, Jenkinson, 2014]

Ένα ανανεωμένο, τροποποιημένο μοντέλο του RothC-26.3 είναι το μοντέλο STRUC-C, το οποίο παρά τους περιορισμούς του αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσπάθεια μοντελοποίησης της διαδικασίας της εδαφικής συσσωμάτωσης. Το μοντέλο STRUC-C λαμβάνει κάθε τύπο συσσωματώματος ως δεξαμενή άνθρακα. Σύμφωνα με το μοντέλο, στις αρχικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ σωματιδίων λαμβάνουν μέρος αργιλικά σωματίδια και συστατικά SOC, τα οποία δημιουργούν οργανικές ορυκτές ενώσεις, οι οποίες με την σειρά τους συνενώνονται προς σχηματισμό των συσσωματωμάτων. Επίσης, θεωρεί ότι ο σχηματισμός των μακρο-συσσωματωμάτων (>250μm) είναι το προϊόν της συσσωμάτωσης των μικρο-συσσωματωμάτων (53-250μm), με τα μακρο-συσσωματώματα να απαρτίζονται από μικρο-συσσωματώματα, συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου (<53μm) και POM [Stamati et al., 2013].

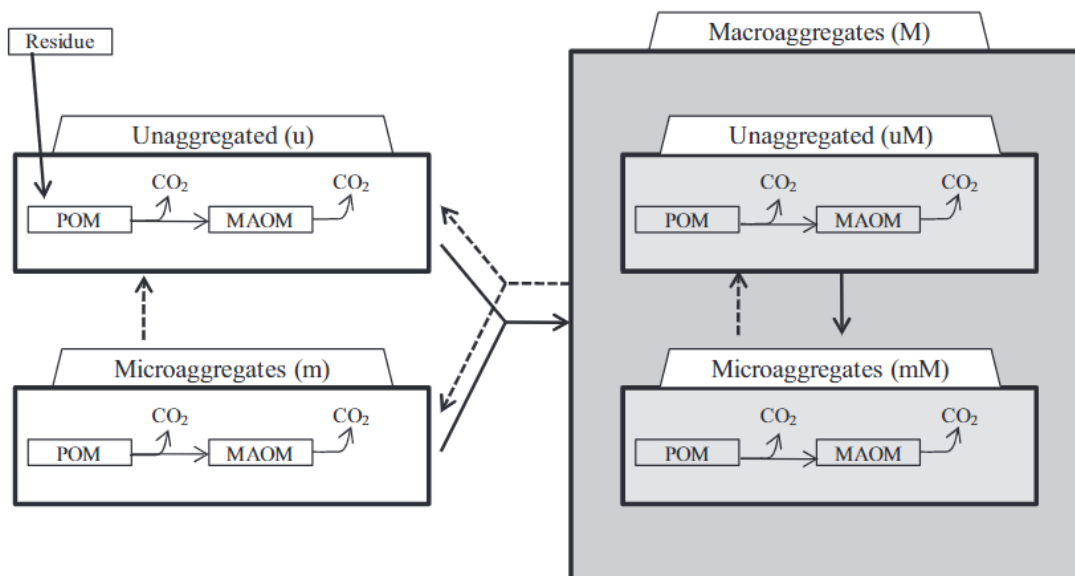
## ii) AggModel και CAST

Οι Nikolaidis & Bidoglio (2013) παρουσίασαν ένα μοντέλο δυναμικής της δομής του εδάφους στο οποίο οι βιογεωχημικοί κύκλοι του άνθρακα (C) και του αζώτου (N) είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την διαδικασία της συσσωμάτωσης. Ο κύκλος του άνθρακα και η διαδικασία της συσσωμάτωσης συνδυάστηκαν μέσω της ανάπτυξης δύο μοντέλων: 1) του AggModel (Aggregation Model) και 2) του CAST (Coupled carbon, Aggregation, Structure Model) [Banwart et al., 2019]. Το AggModel είναι ένα εννοιολογικό μοντέλο της δυναμικής των συσσωματωμάτων του εδάφους το οποίο χωρίζει την εδαφική μάζα σε μη συσσωματωμένο έδαφος (<53μm) και μικρο-συσσωματωμένο έδαφος (53-250μm) που υπάρχει εντός ή εκτός του μακρο-συσσωματωμένου εδάφους (>250μm). Επιπλέον, το μοντέλο σχηματίζει τέσσερα κλάσματα (Σχ.1.19):

- i. Μη συσσωματωμένο έδαφος εκτός μακρο-συσσωματωμάτων (u)
- ii. Μικρο-συσσωματώματα εκτός μακρο-συσσωματωμάτων (m)
- iii. Μικρο-συσσωματώματα εντός μακρο-συσσωματωμάτων (mM)
- iv. Μη μικρο-συσσωματωμένο έδαφος εντός μακρο-συσσωματωμάτων (uM)

Τα κλάσματα u και m σχηματίζουν τα μακρο-συσσωματώματα (M) τα οποία είναι το άθροισμα των mM και uM. Καθένα από τα κλάσματα αποτελούνται από POM και MAOM (Mineral Associated Organic Matter) (Σχ.1.19). Το κλάσμα POM περιλαμβάνει

θρυμματισμένη οργανική ύλη διαφόρων σταδίων αποσύνθεσης (>53μm) και το κλάσμα MAOM είναι η δύσκολα διαχωρίσιμη οργανική ύλη από σωματίδια ορυκτών η οποία έχει αποικοδομηθεί (<53μm) [Segoli et al., 2013].



Σχήμα 1.19. AggModel [Segoli et al., 2013]

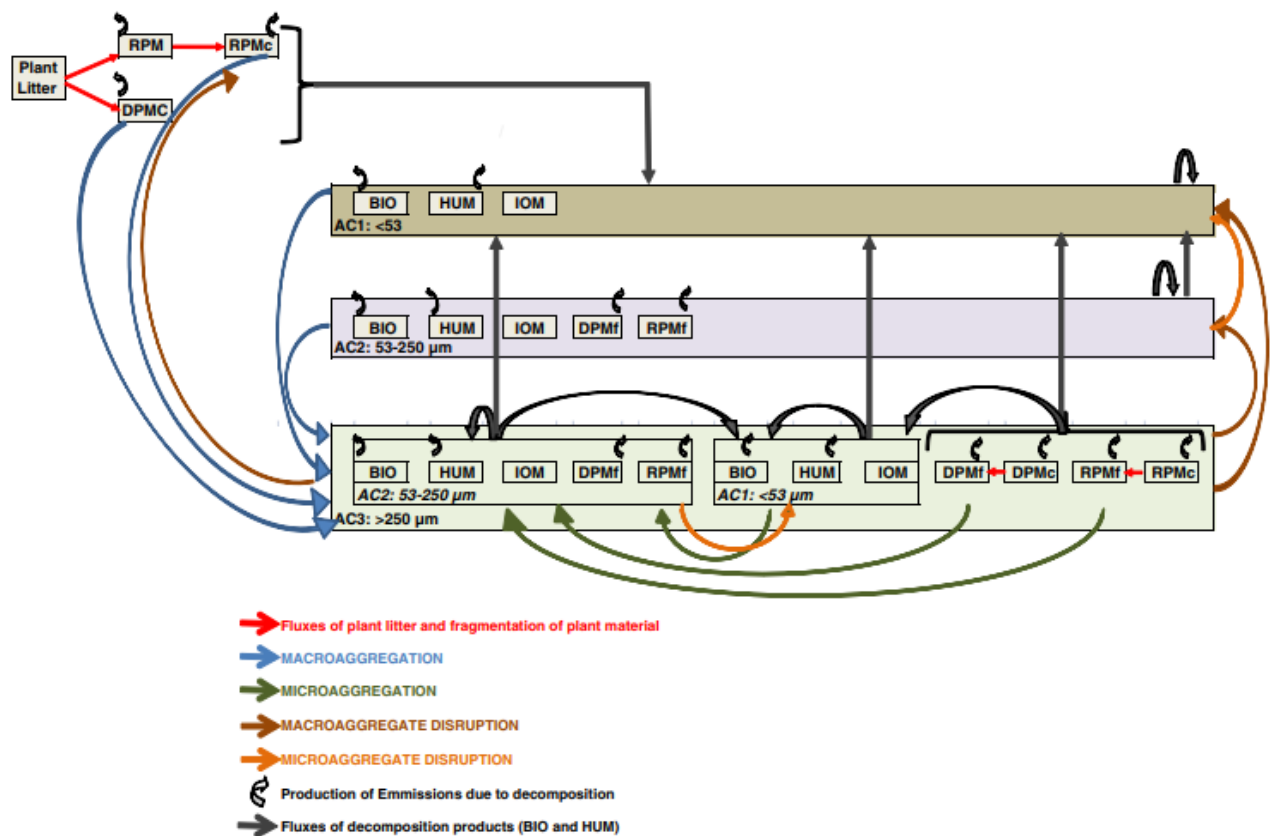
Το μοντέλο CAST (Coupled carbon, Aggregation, Structure Model) δημιουργήθηκε στη Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και είναι το μοντέλο που μελετά τον σχηματισμό μακρο-συσσωματωμάτων γύρω από την POM και την απελευθέρωση μικρο-συσσωματωμάτων λόγω αποικοδομότητας οργανικών υλικών [Stamati et al., 2013]. Το μοντέλο εξετάζει τρεις τύπους συσσωματωμάτων [Banwart et al., 2019] (Σχ.1.20):

- i. Τα μακρο-συσσωματώματα μεγέθους >250μm (AC3)
- ii. Τα μικρο-συσσωματώματα μεγέθους 53-250μm (AC2)
- iii. Τα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου μεγέθους <53μm (AC1)

Επιπροσθέτως, χρησιμοποιεί τις δεξαμενές άνθρακα του μοντέλου RothC-26.3 δηλαδή, την αποσυνθέσιμη φυτική ύλη (DPM, Decomposable Plant Material), την ανθεκτική στην αποσύνθεση φυτική ύλη (RPM, Resistant Plant Material), την μικροβιακή βιομάζα (BIO, Biomass), τη χουμοποιημένη οργανική ύλη (HUM, Humified Organic Matter or Humus) και το αδρανές οργανικό υλικό (IOM, Inert Organic Matter) [Stamati et al., 2013, Banwart et al., 2019]. Τα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος – αργίλου (AC1) αποτελούνται από BIO, HUM και IOM, τα μικρο-συσσωματώματα (AC2) αποτελούνται από BIO, HUM, IOM, DPM<sub>f</sub> και RPM<sub>f</sub> (f for fine) και τα μακρο-συσσωματώματα (AC3) αποτελούνται από BIO, HUM, IOM, DPM<sub>f</sub>, RPM<sub>f</sub>, DPM<sub>c</sub> και RPM<sub>c</sub> (c for coarse) (Σχ.1.20) [Banwart et al., 2019]. Σύμφωνα με το μοντέλο CAST υπολογίζονται η πυκνότητα (bulk density) και το πορώδες του εδάφους (porosity) λαμβάνοντας υπόψη τις παρακάτω διαδικασίες [Banwart et al., 2019]:

- Κατακερματισμός φυτικών υπολειμμάτων
- Σχηματισμός μακρο και μικρο-συσσωματωμάτων
- Αποικοδόμηση άνθρακα
- Διάσπαση μακρο και μικρο-συσσωματωμάτων

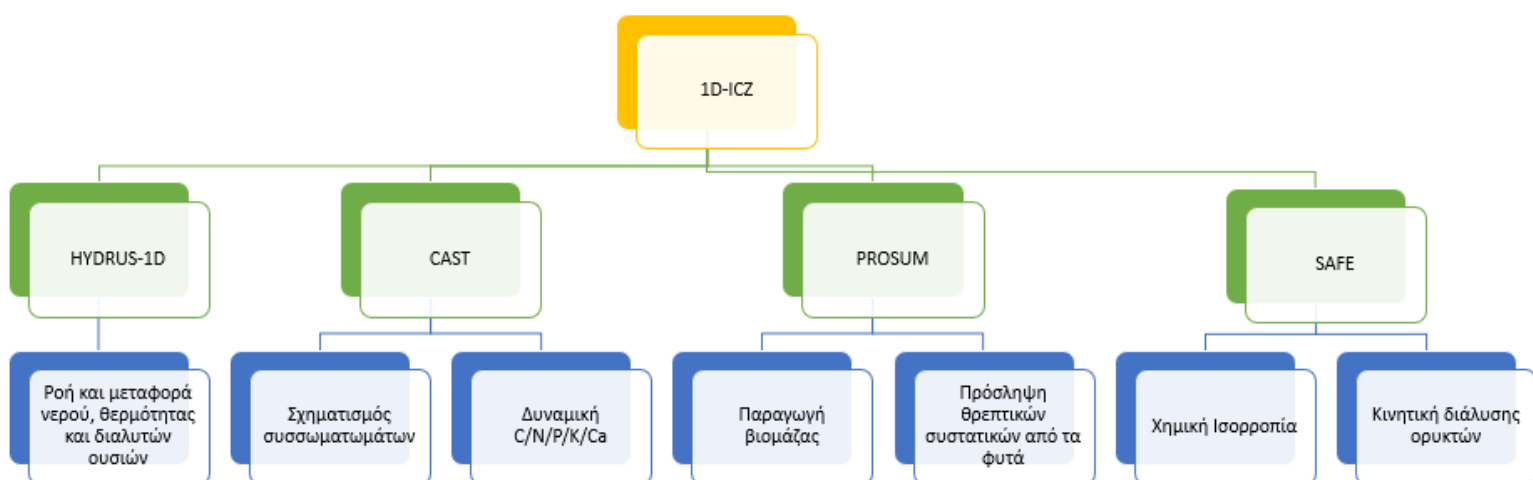
Ειδικότερα, τα φυτικά υπολείμματα ενσωματώνονται στο έδαφος και αποικοιζονται από μικροβιακούς αποσυνθέτες (Σχ.1.12). Οι υφές μυκήτων δεσμεύουν τα εδαφικά σωματίδια απελευθερώνοντας ρίζες και ουσίες υπό μορφή βλέννας (πολυσακχαρίτες) οι οποίες αποτελούν την "κόλλα" των σωματιδίων με τα κύτταρα βακτηρίων και μυκήτων δημιουργώντας τα μακρο-συσσωματώματα γύρω από την POM (Σχ.1.12). Η μακρο-συσσωμάτωση ευνοείται από την ύπαρξη φυτικών υπολειμμάτων και  $DPM_c$  και η σταθερότητά της εξαρτάται από την POM. Μετά τον σχηματισμό των μακρο-συσσωματωμάτων, αυτά αποσυντίθενται, θρυμματίζονται και επικαλύπτονται με μικρο-συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου (AC1inAC3) οδηγώντας στη δημιουργία μικρο-συσσωματωμάτων εντός μακρο-συσσωματωμάτων (AC2inAC3) (Σχ.1.12). Κατόπιν, η περαιτέρω βιοαποικοδόμηση του ενσωματωμένου οργανικού υλικού ελαττώνει την ανάπτυξη και τη δραστηριότητα των μικροβίων με αποτέλεσμα την αστάθεια των μακρο-συσσωματωμάτων. Σε περίπτωση επαφής των συσσωματωμάτων με το νερό, τα μακρο-συσσωματώματα απελευθερώνουν σταθεροποιημένα μικρο-συσσωματώματα και συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου (Σχ.1.12). Τελικά, αν νέα φυτικά υπολείμματα εισαχθούν στο έδαφος, τα  $DPM_c$ ,  $RPM_c$ ,  $DPM_i$ ,  $RPM_i$ , AC1 και AC2 μπορούν να επανενσωματωθούν σε νέα συσσωματώματα [Stamati et al., 2013].



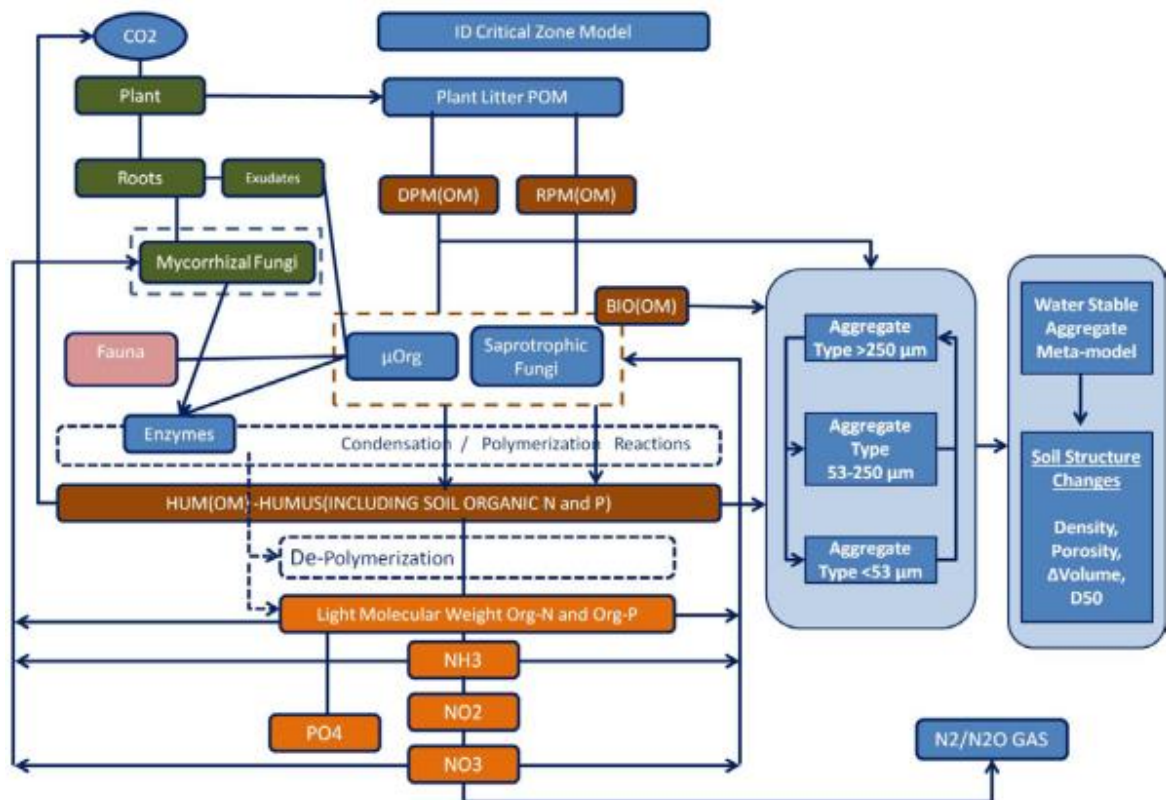
Σχήμα 1.20. Αναπαράσταση εργασιών οργανικού άνθρακα και συσσωματωμάτων στο μοντέλο CAST [Stamati et al., 2013]

### iii) Μοντέλο 1D-ICZ

Πρόσφατα δημιουργήθηκε ένα μοντέλο το οποίο συνδέει όλες τις λειτουργίες που επιτελεί το έδαφος εντός της κρίσιμης ζώνης. Το μοντέλο αυτό είναι το μονοδιάστατο ολοκληρωμένο μοντέλο της κρίσιμης ζώνης (1D-ICZ, Integrated Critical Zone) που συνδυάζει τον σχηματισμό συσσωματωμάτων και την εδαφική δομή με τη δυναμική των θρεπτικών ουσιών και τη βιοποικιλότητα [Nikolaidis et al., 2014]. Το μοντέλο 1D-ICZ αποτελεί μια εξέλιξη του μοντέλου CAST και συνδυάζει τέσσερα βασικά υπομοντέλα (Σχ.1.21). Πιο συγκεκριμένα, συνδυάζει το τροποποιημένο μοντέλο CAST όπου εκτός του άνθρακα (C) και της δημιουργίας συσσωματωμάτων μελετάται η δυναμική των θρεπτικών συστατικών του αζώτου, του φωσφόρου, του ασβεστίου και του καλίου (N, P, Ca, K) (Σχ.1.22). Εκτός από την τροποποιημένη έκδοση του CAST, το μοντέλο 1D-ICZ προσομοιώνει την ροή, την μεταφορά θερμότητας και διαλυμένων ουσιών χρησιμοποιώντας το μονοδιάστατο μοντέλο υδρολογίας HYDRUS-1D. Επίσης, χρησιμοποιεί το μοντέλο PROSUM το οποίο προσομοιώνει τη δυναμική της βιομάζας δηλαδή, την παραγωγικότητα και την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών από τα φυτά. Τέλος, κάνει χρήση του υπομοντέλου SAFE Weathering που μελετά τη χημική ισορροπία (chemical equilibrium), την βιοανάδευση (bioturbation) και την κινητική διάλυσης των ορυκτών (kinetics) [Banwart et al., 2019, Nikolaidis et al., 2014]. Έτσι, με τη χρήση των παραπάνω τεσσάρων υπομοντέλων το 1D-ICZ έχει την δυνατότητα προσομοίωσης και ποσοτικοποίησης των εδαφικών λειτουργιών όπως της δέσμευσης άνθρακα και θρεπτικών συστατικών, της παραγωγής βιομάζας, της διήθησης, του μετασχηματισμού του ύδατος και μπορεί να υπολογίσει τις ατμοσφαιρικές εκπομπές, την αναπλήρωση υδατικών πόρων και την αποστράγγιση. Το μοντέλο 1D-ICZ είναι διαθέσιμο σε δύο εκδόσεις. Η πρώτη είναι με σταθερές υδραυλικές ιδιότητες ενώ η δεύτερη με μεταβλητές υδραυλικές ιδιότητες. Στην περίπτωση δυναμικών υδραυλικών ιδιοτήτων εισάγονται συναρτήσεις (pedotransfer functions) με μεταβλητές όπως η φαινόμενη πυκνότητα (bulk density), το περιεχόμενο των υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (water stable aggregate content) και τέλος, η οργανική ύλη που σχετίζεται με την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα [Banwart et al., 2019]. Η διαδικασία στησίματος των υπομοντέλων HYDRUS-1D, CAST, PROSUM, SAFE και του μοντέλου 1D-ICZ παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Ι.



Σχήμα 1.21. Υπομοντέλα του 1D-ICZ



Σχήμα 1.22. Αναπαράσταση τροποποιημένης έκδοσης CAST για χρήση απ' το μοντέλο 1D-ICZ [Nikolaidis et al., 2014]

#### iv) Μοντέλα HYDRUS-1D και SAFE

Το μονοδιάστατο μοντέλο υδρολογίας HYDRUS-1D προσομοιώνει την ροή και μεταφορά νερού, θερμότητας και διαλυτών ουσιών σε ακόρεστα, εν μέρη κορεσμένα και κορεσμένα πορώδη μέσα, με την ροή και την μεταφορά να συμβαίνουν σε οριζόντια, κάθετη και κεκλιμένη κατεύθυνση.

Το HYDRUS-1D έχει την ικανότητα αριθμητικής λύσης της εξίσωσης Richards (1.5) για την εξίσωση ροής νερού και την εξίσωση μεταφοράς (διασπορά) θερμότητας και διαλυτών ουσιών. Η εξίσωση της ροής περιλαμβάνει έναν όρο πρόσληψης (S, Sink term) που υπολογίζει την ποσότητα νερού που προσλαμβάνεται από το ριζικό σύστημα των φυτών [Šimůnek et al., 2009].

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (1.5)$$

όπου,

- $\theta$  το περιεχόμενο της υγρασίας
- $t$  ο χρόνος (T)
- $x$  η χωρική συντεταγμένη (L)
- $K$  η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα ( $L T^{-1}$ )



- $h$  το ύψος πίεσης (L)
- $\alpha$  η γωνία μεταξύ του κατακόρυφου άξονα και της κατεύθυνσης ροής (0-90°)
- $S$  ο όρος πρόσληψης ( $T^{-1}$ )

Το τμήμα του μοντέλου που ασχολείται με την ροή του νερού λαμβάνει όρια ροής, ελεγχόμενα όρια από ατμοσφαιρικές συνθήκες και οριακές συνθήκες ελεύθερης αποστράγγισης. Η εξίσωση μεταφοράς θερμότητας περιλαμβάνει την μεταφορά θερμότητας λόγω συναγωγής και αγωγιμότητας με το ρέων νερό. Οι εξισώσεις μεταφοράς διαλυτών ουσιών περιλαμβάνουν την μεταφορά μέσω διασποράς στην υγρή φάση και τη διάχυση στην αέρια φάση. Επίσης, οι εξισώσεις μεταφοράς διαλυμένων ουσιών προβλέπουν μη γραμμικές αντιδράσεις μεταξύ υγρής και στερεάς φάσης που δεν βρίσκονται σε ισορροπία και γραμμικές αντιδράσεις ισορροπίας μεταξύ αέριας και υγρής φάσης. Επιπλέον, το HYDRUS-1D μπορεί να προσομοιώσει την μεταφορά και την παραγωγή  $CO_2$  μέσω των διαδικασιών της διάχυσης σε υγρή και αέρια φάση και της οριζόντιας μεταφοράς σε υγρή φάση καθώς και την μεταφορά ιόντων διαλυμένων ουσιών [Šimůnek et al., 2009]. Οι μεταβλητές του συστήματος χημικής ισορροπίας (chemical equilibrium) αποτελούν:

- Στην υδατική φάση:  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $H^+$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $OH^-$ ,  $F^-$ ,  $A^{3-}$ ,  $H_2CO_3$ ,  $CaCO_3$  (l),  $CaHCO_3^+$ ,  $CaOH^+$ ,  $CaSO_4$  (l),  $MgCO_3$ ,  $MgHCO_3^+$ ,  $MgOH^+$ ,  $MgSO_4$ ,  $NaSO_4^-$ ,  $NaCO_3^-$ ,  $KSO_4^-$ ,  $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_2^+$ ,  $Al(OH)_3$ ,  $Al(OH)_4^-$ ,  $AlF_2^+$ ,  $AlF_3$ ,  $AlF_4^-$ ,  $AlF_5^{2-}$ ,  $AlSO_4^+$ ,  $Al(SO_4)_2^-$ ,  $AlA$ ,  $Al(HA)^+$ ,  $HA^2$ ,  $H_2A$ ,  $H_3A$ ,  $NH_3$  and  $NH_4^+$
- Σε φάση ανταλλαγής κατιόντων:  $X-Ca^{2+}$ ,  $X-Mg^{2+}$ ,  $X-Na^+$ ,  $X-K^+$ ,  $X-Al^{3+}$ ,  $Surface-O^-$ ,  $Surface-OH$ ,  $Surface-OH_2^+$ ,  $Surface-OH_2SO_4$
- Στην στερεά φάση:  $CaCO_3$  (ασβεστίτης),  $CaSO_4$  (γύψος),  $Al(OH)_3$  (Γιββσίτης)
- Στην αέρια φάση:  $CO_2$ ,  $NH_3$

και οι μεταβλητές του μοντέλου SAFE Weathering περιλαμβάνουν:  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Al^{3+}$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $H_4SiO_4$  [Nikolaidis et al., 2014].

## ν) Μοντέλο PROSUM

Το PROSUM είναι ένα μοντέλο δυναμικής ανάπτυξης των φυτών που προσομοιώνει εκτάσεις που έχουν υποστεί όργωμα (άροση), θαμνώδεις εκτάσεις, λιβάδια και δάση σ' ένα ευρύ φάσμα εδαφολογικών και κλιματικών συνθηκών. Μελετά την επίδραση των μυκορριζών στην απόκτηση θρεπτικών συστατικών από τα φυτά και την απόρριψη υπολειμμάτων στο έδαφος (litterfall). Η πρόσληψη θρεπτικών ουσιών είναι μια διαδικασία ζωτικής σημασίας για τα φυτά καθώς επηρεάζει τον ρυθμό ανάπτυξης των φυτών, την ποιότητα και την ποσότητα της βιομάζας που απορρίπτεται στο έδαφος. Τα φυτά αποθηκεύουν τις θρεπτικές ουσίες στους φυτικούς ιστούς. Όταν ένα βασικό στοιχείο βρίσκεται στην μικρότερη διαθεσιμότητα, τότε αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα του οικοσυστήματος και σύμφωνα με τον «νόμο του ελαχίστου» (von Liebig, 1840) το στοιχείο αυτό καθορίζει την παραγωγή βιομάζας [Nikolaidis et al., 2014]. Αν όμως η προσβασιμότητα του περιοριστικού αυτού παράγοντα αυξηθεί τότε μπορεί να αντικατασταθεί με άλλον [Χατζημπίρος, 2014]. Παρ' όλα αυτά, τα φυτά είναι ικανά να αυξήσουν την πρόσβασή τους στα θρεπτικά συστατικά μέσω του πολλαπλασιασμού του ριζικού τους συστήματος, των εκκριμάτων ριζών και εξωενζύμων και της συμβίωσης με τις μυκορριζές.



Σύμφωνα με το μοντέλο PROSUM τα φυτά διακρίνονται σε 6 κατηγορίες:

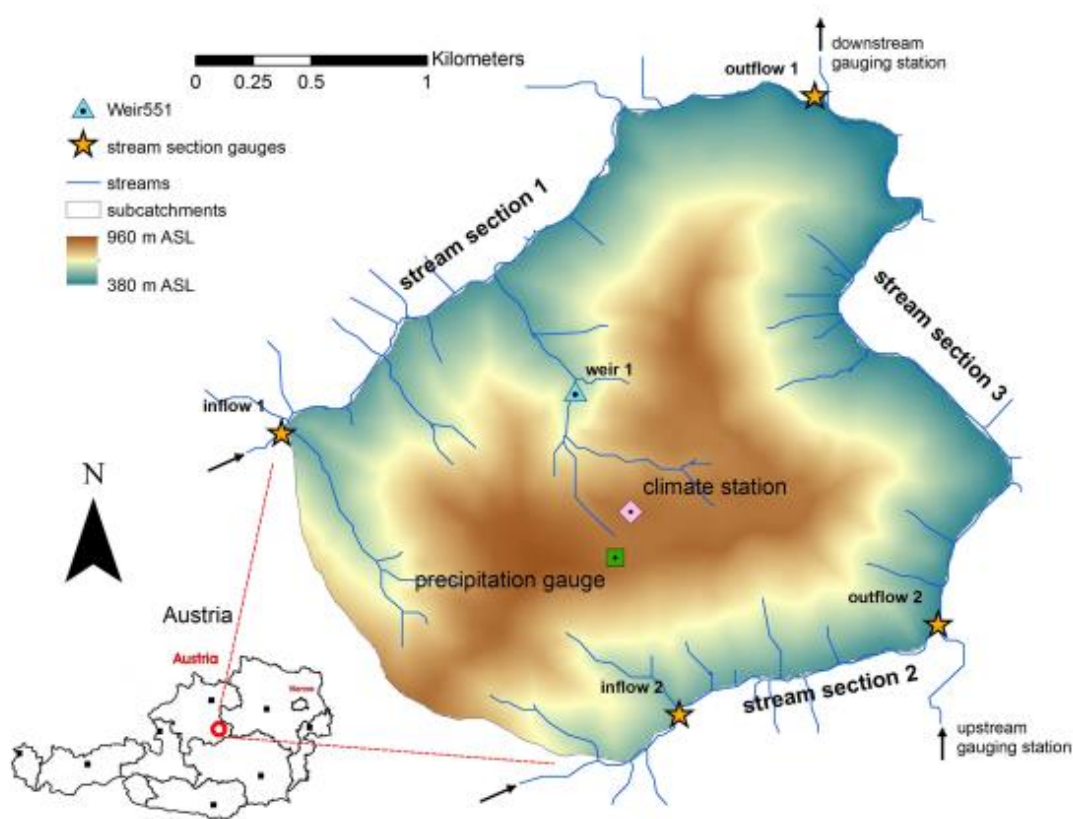
1. Ξηλώδη, φυλλοβόλα, μυκορριζικά (woody, deciduous, mycorrhizal)
2. Ξηλώδη, φυλλοβόλα, μη μυκορριζικά (woody, deciduous, non-mycorrhizal)
3. Ξηλώδη, αειθαλή, μυκορριζικά (woody, evergreen, mycorrhizal)
4. Ξηλώδη, αειθαλή, μη μυκορριζικά (woody, evergreen, non-mycorrhizal)
5. Βοτανώδη, μυκορριζικά (herbaceous, mycorrhizal)
6. Βοτανώδη, μη μυκορριζικά (herbaceous, non-mycorrhizal)

Το μοντέλο PROSUM για να προβλέψει την παραγωγή βιομάζας ( $\text{mol C m}^{-2}$ ) ανταποκρίνεται σε περιορισμούς νερού, θερμοκρασίας, φωτός,  $\text{CO}_2$  και θρεπτικών συστατικών (Ca, P, N, K, Mg). Επίσης, λαμβάνει υπόψη μεθόδους διαχείρισης όπως είναι το όργωμα (tillage) και η συγκομιδή (harvest). Το όργωμα ελαττώνει την οργανική ουσία του εδάφους μεταφέροντας όλες τις δεξαμενές που βρίσκονται πάνω απ' το έδαφος (aboveground pools) και το 95% των δεξαμενών κάτω από το έδαφος (belowground pools) από βιομάζα σε απορρίμματα επιταχύνοντας τη διεργασία της αποσύνθεσης. Η συγκομιδή είναι η επιλεκτική αφαίρεση μέρους του φυτού η οποία οδηγεί ποσότητα απορριμμάτων να πέσει στο έδαφος (harvest litter) [Nikolaidis et al., 2014].

## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1. Περιγραφή περιοχής μελέτης

Περιοχή μελέτης της διατριβής είναι ο σταθμός "LTER Zöbelboden" (Σχ.2.1) έκτασης περίπου 5.7 km<sup>2</sup> που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του Εθνικού Πάρκου Kalkalpen της Αυστρίας [Hartmann et al., 2016]. Είναι περίπου 50 km νότια του Linz με γεωγραφικές συντεταγμένες 47°50'30"N, 14°26'30"E [Hartmann et al., 2011]. Το 1992 το δασικό οικοσύστημα Zöbelboden καθιερώθηκε από την Υπηρεσία Περιβάλλοντος της Αυστρίας (ΕΑΑ, Environmental Agency Austria) ως σταθμός παρακολούθησης βάσει της Σύμβασης των Ηνωμένων Εθνών για τη διασυνοριακή ατμοσφαιρική ρύπανση μεγάλης εμβέλειας (CLRTAP, Convention on Long Range Transboundary Air Pollution). Σήμερα αποτελεί σταθμό του Ευρωπαϊκού δικτύου μακροπρόθεσμης έρευνας οικοσυστήματος «eLTER – European Long-Term Ecosystem and socio-ecological Research Infrastructure» [Helm et al., 2017].

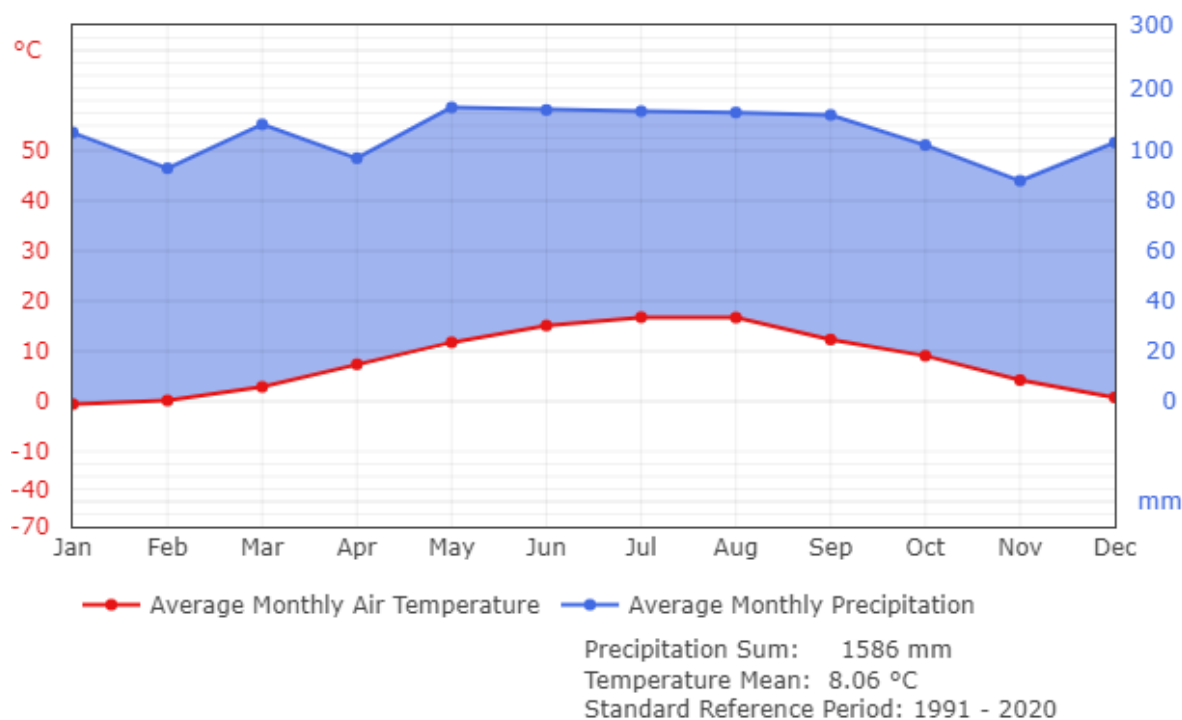


Σχήμα 2.1. Σταθμός LTER Zöbelboden [Hartmann et al., 2016]

Το Zöbelboden αντιπροσωπεύει μια δασώδη λεκάνη απορροής 90 εκταρίων μιας καρστικής οροσειράς υψόμετρου 500-950 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (a.s.l, above sea level). Η διαχείρισή του γίνεται από τον Οργανισμό Περιβάλλοντος Αυστρίας σε συνεργασία με τεχνικούς του Εθνικού Πάρκου Kalkalpen και των Αυστριακών Ομοσπονδιακών Δασών [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)].

### 2.1.1. Μετεωρολογικές συνθήκες, ορυκτολογική σύσταση και βλάστηση ευρύτερης περιοχής

Η μέση ετήσια θερμοκρασία του δάσους είναι 8.06 °C και η μέση μηνιαία θερμοκρασία κυμαίνεται από τους -1°C (Ιανουάριος) στους 16.8°C (Ιούλιος) (Διάγραμμα 2.1) [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)]. Η μέση ετήσια βροχόπτωση παρουσιάζει μια διακύμανση μεταξύ 1,500–1,800 mm και φαινόμενα χιονοκάλυψης επικρατούν μεταξύ Οκτωβρίου και Μαΐου με μέση διάρκεια τους τέσσερις μήνες [Hartmann et al., 2016].



Διάγραμμα 2.1. Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία και Βροχόπτωση Zöbelboden [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)]

Όσον αφορά την ορυκτολογική σύσταση, το Zöbelboden κυριαρχείται από δολομίτη (Hauptdolomit) επικαλυπτόμενο με Ιουρασικούς/Κρητιδικούς ασθεστόλιθους (Jurassic/Cretaceous limestones), ασβεστόλιθους Platten (Plattenkalk) και μάργες (marls) [Hartmann et al., 2011]. Ο δολομίτης προσδίδει καρστικά χαρακτηριστικά στην λεκάνη απορροής όπως ρωγμές, σχισμές και καταβόθρες. Το δάσος αποτελείται από απότομες πλαγιές κλίσης 30-70° υψομέτρου 550-880m (a.s.l) και από ένα οροπέδιο έκτασης 0.6 km<sup>2</sup> και υψομέτρου 850-950m (a.s.l). Τα εδάφη των πλαγιών κυριαρχούνται από lithic and rendzic leptosols μέσου πάχους 12 cm ενώ τα εδάφη στο οροπέδιο αποτελούνται από chromic cambisols and hydromorphic stagnosols μέσου πάχους 50 cm.

Η περιοχή μελέτης είναι ένα ημιφυσικό μεικτό εύκρατο δάσος που αποτελείται κυρίως από οξιές (*Fagus sylvatica* L.) και έλατα Νορβηγίας (*Picea abies* (L.) Karst.) τα οποία φυτεύτηκαν το 1910. Το κυρίαρχο είδος βλάστησης είναι η δασική οξιά (*Fagus sylvatica* L.) (Σχ.2.2) η οποία είναι ένα φυλλοβόλο δέντρο ενώ το έλατο Νορβηγίας (*Picea abies*) είναι ένα αειθαλές (evergreen) κωνοφόρο δέντρο (Σχ.2.3). Εκτός από τη

δασική οξιά και την ερυθρελάτη Νορβηγίας στο δάσος υπάρχουν και τα είδη: ψευδοπλάτανος (*Acer pseudoplatanus*) (Σχ.2.4), φράξινος ή τέφρα (*Fraxinus excelsior*) (Σχ.2.5), πεύκο (*Larix decidua* Mill.) (Σχ.2.6) και λευκή ελάτη (*Abies alba* Mill.) (Σχ.2.7) [Helm et al., 2017, Hartmann et al., 2016]. Από τα παραπάνω είδη δέντρων, τα *Larix decidua* Mill. και *Abies alba* Mill. είναι κωνοφόρα (*coniferous*) ενώ τα *Acer pseudoplatanus* και *Fraxinus excelsior* είναι φυλλοβόλα (*deciduous*) [Helm et al., 2017]. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι από την ίδρυση του Εθνικού Πάρκου, εκτός από την αφαίρεση δέντρων *Picea abies* που έχουν προσβληθεί από σκαθάρια, δεν έχουν υπάρξει μέθοδοι διαχείρισης όπως όργωμα, συγκομιδή και εισαγωγή λιπασμάτων [Helm et al., 2017, Hartmann et al., 2016].



Σχήμα 2.2. *Fagus sylvatica* L. [<https://www.agriamanitaria.gr/fagus-sylvatica-%CE%B4%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%BF%CE%BE%CE%B9%CE%AC/>]





Σχήμα 2.3. *Picea abies* L. Karst [Bissanti, 2018]



Σχήμα 2.4. *Acer pseudoplatanus* [<https://www.i-flora.com/en/the-smartphone-apps/iflora-baeume/species/art/show/acer-pseudoplatanus-1.html>]





Σχήμα 2.5. *Fraxinus excelsior* [<https://www.i-flora.com/en/image-search/phylogenetic-tree/art/showgallery/fraxinus-excelsior.html>]



Σχήμα 2.6. *Larix decidua* Mill. [<https://www.agriamanitaria.gr/larix-decidua-%CE%BB%CE%AC%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%B1%CF%82-%CE%BF-%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BD%CF%8C%CF%82-2/>]



Σχήμα 2.7. *Abies alba* Mill. [<https://www.agriamanitaria.gr/abies-alba-%CE%BB%CE%B5%CF%85%CE%BA%CE%AE-%CE%B5%CE%BB%CE%AC%CF%84%CE%B7/>]

### 2.1.2. Μετρήσεις σταθμού eLTER Zöbelboden

Ο σταθμός eLTER Zöbelboden παρέχει μακροπρόθεσμες σειρές δεδομένων οικοσυστημικών, φυσικών, χημικών, βιολογικών, ατμοσφαιρικών και εδαφικών παραμέτρων. Τα δεδομένα αυτά, ευνοούν την παρακολούθηση και την έρευνα των επιπτώσεων των κύκλων του άνθρακα και του αζώτου, της κλιματικής αλλαγής, της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της βιοποικιλότητας του δασικού οικοσυστήματος [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)]. Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα περιλαμβάνουν μετρήσεις:

#### 1. Μετεωρολογικών και κλιματικών συνθηκών (Eddy covariance flux tower)

- Θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ )
- Υγρασίας (%)
- Βροχόπτωσης (mm)
- Ταχύτητας ανέμου ( $\text{m s}^{-1}$ )
- Κατεύθυνσης ανέμου ( $^{\circ}$ )
- Πίεσης αέρα (mbar και hPa)
- Ακτινοβολίας ( $\text{W m}^{-2}$ )
- Καθαρής ακτινοβολίας ( $\text{W m}^{-2}$ )
- Ροής λανθάνουσας θερμότητας ( $\text{W m}^{-2}$ )
- Ακτινοβολίας φωτοσύνθεσης ( $\text{W m}^{-2}$ )
- Διάχυτης ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος ( $\text{W m}^{-2}$ )
- Απευθείας ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος ( $\text{W m}^{-2}$ )
- Ανακλώμενης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος ( $\text{W m}^{-2}$ )
- Διάρκειας ηλιοφάνειας (min)

2. Χημείας Βροχοπτώσεως (Precipitation chemistry)
  - Αλκαλικότητας ( $\mu\text{eq L}^{-1}$ )
  - Αγωγιμότητας ( $\text{mS m}^{-1}$ )
  - pH
  - Ni, Al, Zn, Cu, Pb, Cr, Cd, Mn, Fe, As, Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
  - Ca, Na, Mg, K, Cl,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{SO}_4\text{-S}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  ( $\text{mg L}^{-1}$ )
  - NTOT – Total nitrogen ( $\text{mg L}^{-1}$ )
  - DOC – Dissolved Organic Carbon ( $\text{mg C L}^{-1}$ )
3. Χημείας εδαφικού διαλύματος (Soil water chemistry)
  - Αλκαλικότητας ( $\mu\text{eq L}^{-1}$ )
  - Αγωγιμότητας ( $\text{mS m}^{-1}$ )
  - pH
  - Ca, Na, Mg, Cl, K, F,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{SO}_4\text{-S}$  ( $\text{mg L}^{-1}$ )
  - NTOT, STOT, DOC ( $\text{mg L}^{-1}$ )
  - TOC, TC –Total Carbon, TIC –Total Inorganic Carbon (%)
4. Χημείας υγρής εναπόθεσης (Throughfall chemistry)
  - Αλκαλικότητας ( $\mu\text{eq L}^{-1}$ )
  - Αγωγιμότητας ( $\text{mS m}^{-1}$ )
  - pH
  - Ca, Na, Mg, Cl, K,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{SO}_4\text{-S}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$ , NTOT, DOC ( $\text{mg L}^{-1}$ )
  - Al, As, Ni, Cu, Cr, Cd, Pb, Mn, Fe, Hg, Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
5. Χημείας επιφανειακής απορροής (Runoff water chemistry)
  - Αλκαλικότητας ( $\mu\text{eq L}^{-1}$ )
  - Αγωγιμότητας ( $\text{mS m}^{-1}$  και  $\mu\text{S cm}^{-1}$ )
  - Θολότητας (FTU)
  - Θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - Παροχής ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )
  - Στάθμης νερού (m)
  - pH
  - Na, Ca, F, K, Cl, Mg,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{SO}_4\text{-S}$  ( $\text{mg L}^{-1}$ )
  - Al, As, Ni, Zn, Cu, Cd, Cr, Mn, Fe, Pb, Sr, Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
  - NTOT, STOT, PTOT, TOC, DOC ( $\text{mg L}^{-1}$ )
6. Χημείας απορριμμάτων βιομάζας (Litterfall chemistry)
  - Ca, Na, K, Mg ( $\text{mg g}^{-1}$ )
  - Cd, Cu, Pb, Zn, Mn, B, Mo ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
  - TOC, NTOT, PTOT, STOT ( $\text{mg g}^{-1}$ )
7. Εδαφικής δομής (Soil structure)
  - Φαινόμενης πυκνότητας – bulk density ( $\text{kg m}^{-3}$ )
  - Βάθους εδάφους (cm)
  - Ειδών εδάφους
  - Κλίσεων πλαγιών (%)
  - Κλάσματος εδάφους 6.3 – 2 mm
  - Κλάσματος εδάφους 2 – 0.63 mm
  - Κλάσματος εδάφους 0.63 – 0.2 mm



- Κλάσματος εδάφους 0.2 – 0.063 mm
- Κλάσματος εδάφους 0.063 – 0.02 mm
- Κλάσματος εδάφους 0.02 – 0.0063 mm
- Κλάσματος εδάφους 0.0063 – 0.002 mm
- Κλάσματος εδάφους 0.002 – 0.00063 mm
- Κλάσματος εδάφους 0.002 – 0.00063 mm
- Κλάσματος εδάφους 0.00063 – 0.0002 mm
- Κλάσματος εδάφους <0.0002 mm

#### 8. Βλάστησης (Vegetation)

- Ειδών βλάστησης
- Ποσοστού κάλυψης (%)

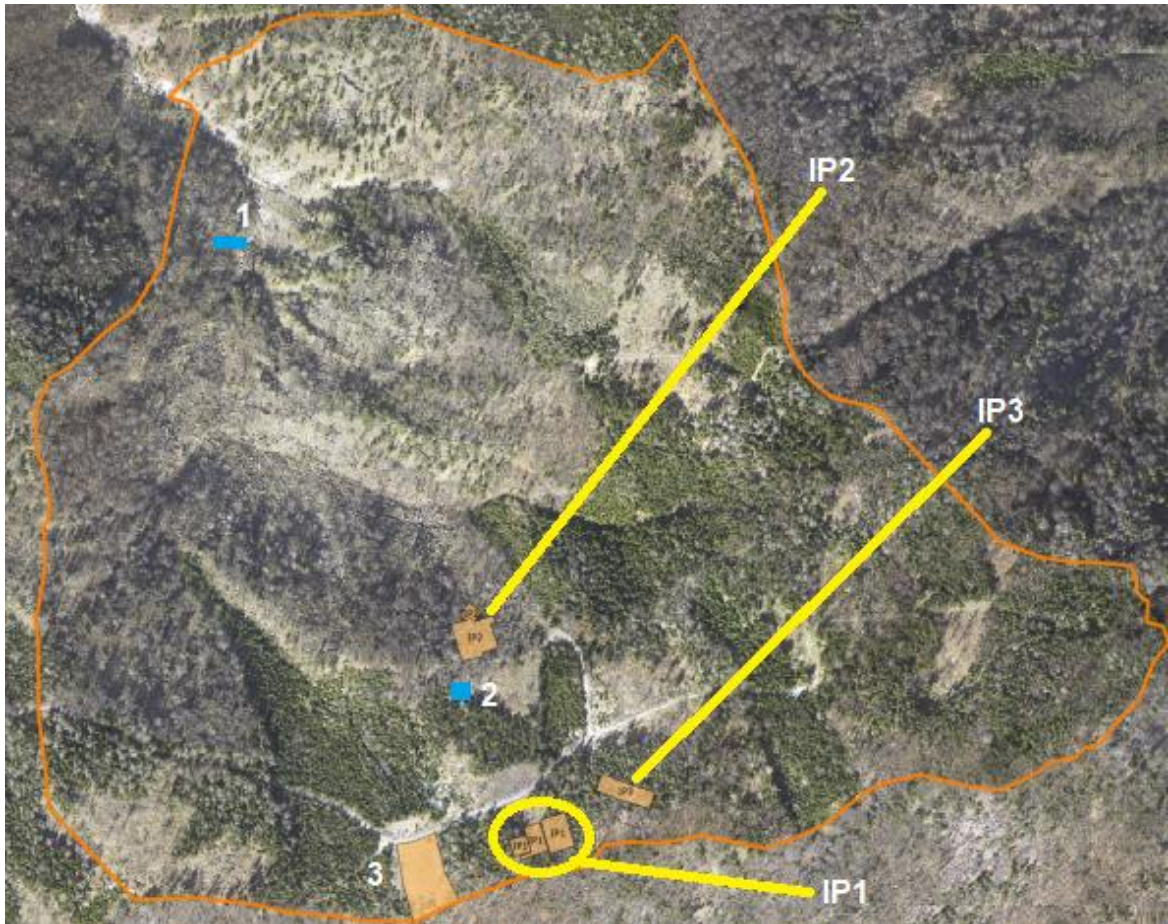
#### 9. Ανάπτυξης δέντρων (Tree growth)

- Ανάπτυξης κλαδιών – branch growth ( $\text{kg m}^{-2}$ )
- Ανάπτυξης φυλλώματος – foliage growth ( $\text{kg m}^{-2}$ )
- Ανάπτυξης κορμού – stem growth ( $\text{kg m}^{-2}$ )

#### 10. Βιομάζας (Biomass)

- Βιομάζας πάνω από το έδαφος – aboveground biomass ( $\text{g m}^{-2}$ )
- Βιομάζας κλαδιών – branch biomass ( $\text{g m}^{-2}$ )
- Βιομάζας φυλλώματος – foliage biomass ( $\text{g m}^{-2}$ )
- Βιομάζας κορμού – stem biomass ( $\text{g m}^{-2}$ )
- Διαμέτρου στο ύψος στήθους – diameter at breast height (mm)
- Ύψους δέντρων *Fagus sylvatica*, *Picea abies* κ.α. (m)

Η έκταση που χρησιμοποιείται για την συλλογή δεδομένων παρουσιάζεται στο σχήμα 2.8 και αποτελείται από τις περιοχές δειγματοληψίας IP1, IP2, IP3, από τις τοποθεσίες εξοπλισμού 1, 2 και από την ανοιχτή περιοχή 3. Ειδικότερα, στις περιοχές IP1, IP2 και IP3 (Σχ.2.8) λαμβάνονται δείγματα για τη χημεία απορριμμάτων βιομάζας (litterfall chemistry) (Σχ.2.9), για τη χημεία εδαφικού διαλύματος (soil water chemistry), για τη χημεία υγρής εναπόθεσης (throughfall chemistry), για την ανάπτυξη δέντρων (tree growth), τη βλάστηση (vegetation) και τη βιομάζα (biomass). Στην τοποθεσία 1 (Σχ.2.8), υπάρχει ένας υδατοφράκτης (weir) (Σχ.2.10) στον οποίο έχει τοποθετηθεί ένας σταθμός μέτρησης απορροής (runoff gauging station) που μετράει τους χημικούς παράγοντες της επιφανειακής απορροής. Στην τοποθεσία 2 (Σχ.2.8) υπάρχει ένας πύργος Eddy covariance (flux tower) (Σχ.2.11) που μετράει μετεωρολογικές και κλιματολογικές παραμέτρους ενώ στην περιοχή 3 (Σχ.2.8) πραγματοποιούνται μετρήσεις χημείας της βροχόπτωσης (precipitation chemistry) [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)].



Σχήμα 2.8. Περιοχές δειγματοληψίας – μετρήσεων Zöbelboden [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)]



α)



β)

Σχήμα 2.9. α) Δειγματολήπτης litterfall, β) Παρακολούθηση βλάστησης [Proell, Dirnboeck, 2022 (2), Proell, Dirnboeck, 2022 (1)]





Σχήμα 2.10. Υδατοφράκτης με σταθμό μέτρησης απορροής [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)]



Σχήμα 2.11. Πύργος Eddy covariance [Proell, Dirnboeck, 2022 (1)]

## **2.2. Αρχικοποίηση μοντέλου 1D-ICZ**

Όπως προαναφέρθηκε το μονοδιάστατο ολοκληρωμένο μοντέλο κρίσιμης ζώνης (1D-ICZ, Integrated Critical Zone) αποτελείται από τέσσερα υπομοντέλα: το μοντέλο ροής και μεταφοράς διαλυτών ουσιών και θερμότητας (HYDRUS-1D), το μοντέλο δημιουργίας συσσωματωμάτων και δυναμικής των θρεπτικών ουσιών C, N, P, Ca και Mg (CAST), το μοντέλο δυναμικής της βιομάζας και πρόσληψης θρεπτικών ουσιών από τα φυτά (PROSUM) και τέλος, το μοντέλο κινητικής διάλυσης ουσιών και χημικής ισορροπίας (SAFE).

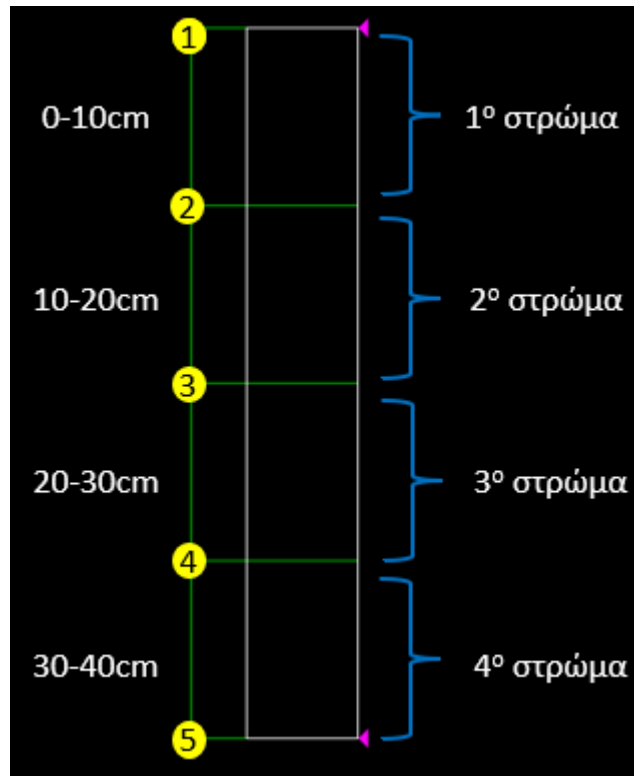
Η αρχικοποίηση (setup) και βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου 1D-ICZ πραγματοποιήθηκε 2 φορές, αρχικά για μια χρονική περίοδο 5 ετών (2015-2019), δηλαδή 60 μηνών και δευτερευόντως, για ένα χρονικό διάστημα 25 ετών (1996-2020) δηλαδή 300 μηνών. Για την αρχικοποίηση και τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις πεδίου του σταθμού eLTER Zöbelboden, οι οποίες επεξεργάστηκαν προς τις κατάλληλες χρονοσειρές, λαμβάνοντας υπόψη ότι το δασικό οικοσύστημα δεν υπόκεινται σε καμία μέθοδο διαχείρισης π.χ. συγκομιδή, άροση, εισαγωγή λιπασμάτων, κοπριάς κλπ.

### **2.2.1. Αρχικοποίηση μοντέλου HYDRUS-1D για 60 μήνες**

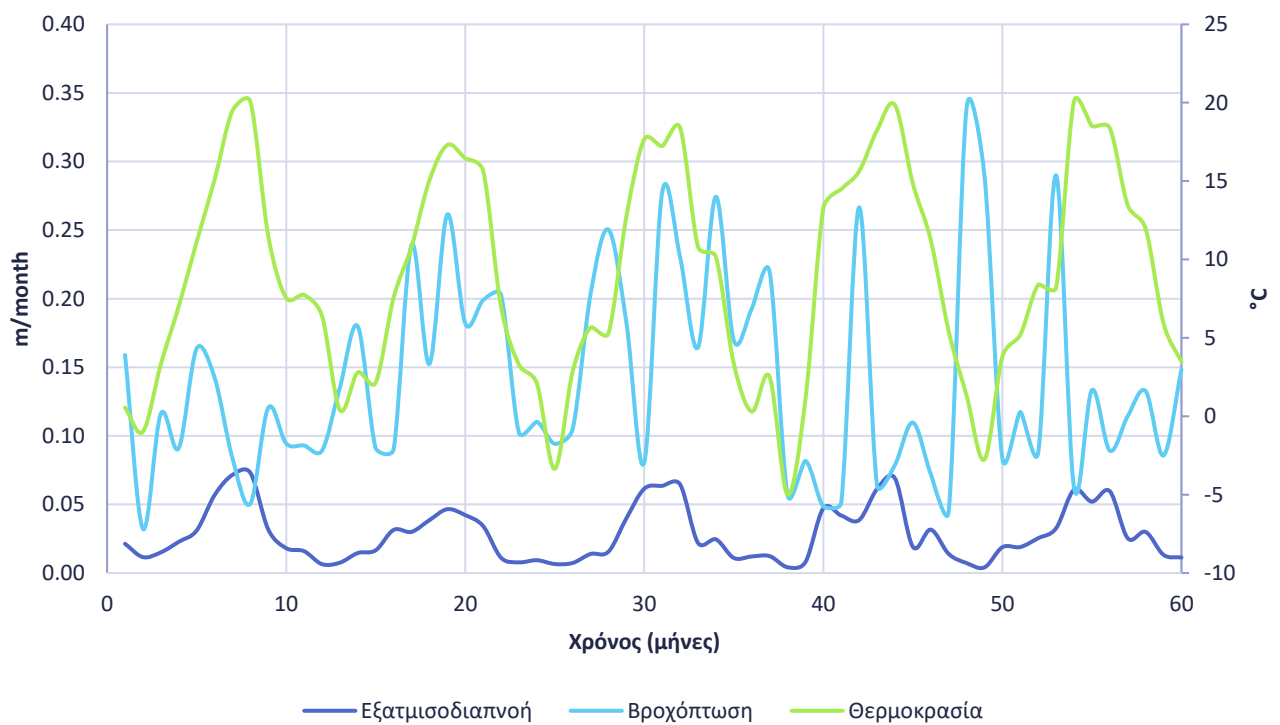
Το μοντέλο HYDRUS-1D προσομοιώνει την ροή και μεταφορά νερού, θερμότητας και διαλυτών ουσιών χρησιμοποιώντας πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά της κάθετης τομής του εδαφικού προφίλ το οποίο ορίστηκε στα 40cm. Το εδαφικό προφίλ αποτελείται από 5 κόμβους (nodes) και 4 στρώματα (layers) (Σχ.2.12). Η προσομοίωση της ροής νερού γίνεται μέσω των εξισώσεων του μοντέλου ενός πορώδους (single porosity model) van Genuchten–Mualem ενώ η μεταφορά θερμότητας περιγράφεται από την εξίσωση Chung and Horton.

Οι οριακές συνθήκες (boundary conditions) της εδαφικής επιφάνειας σχετίζονται με την επιφάνεια αλληλεπίδρασης εδάφους–αέρα, δηλαδή με ένα επιφανειακό στρώμα στο οποίο συσσωρεύεται νερό, του οποίου το ύψος ύδατος εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, την εξατμισοδιαπνοή και τη διήθηση. Οι κατακρημνίσεις (βροχόπτωση, χιονόπτωση κ.α.) αυξάνουν το ύψος νερού ενώ αντίθετα, οι διαδικασίες της εξάτμισης και της διήθησης το ελαττώνουν. Οι άνω οριακές συνθήκες (upper boundary conditions) αποτελούνται από τον μηνιαίο ρυθμό βροχόπτωσης, τον μηνιαίο ρυθμό εξατμισοδιαπνοής και τη θερμοκρασία της εδαφικής επιφάνειας, δηλαδή τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας σε μηνιαία χρονοσειρά (Πίν.Π2.1, Διάγραμμα 2.2) ενώ οι κάτω οριακές συνθήκες (lower boundary conditions) επιλέχθηκαν ως συνθήκες ελεύθερης αποστράγγισης (free drainage).

Όσον αφορά την μεταφορά διαλυτών ουσιών επιλέχθηκε μοντέλο χημικής ισορροπίας. Οι αρχικές τιμές των ειδών της χημείας του εδαφικού διαλύματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.



Σχήμα 2.12. Εδαφικό προφίλ με 5 κόμβους και 4 στρώματα



Διάγραμμα 2.2. Οριακές συνθήκες θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής

Πίνακας 2.1. Αρχικές συγκεντρώσεις εδαφικού διαλύματος

Χημικό είδος	Συγκέντρωση (mol L <sup>-1</sup> )	Χημικό είδος	Συγκέντρωση (mol L <sup>-1</sup> )
Ca <sup>2+</sup>	3.327E-04	H <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	3.065E-12
Mg <sup>2+</sup>	4.182E-04	HA	1.131E-10
Na <sup>+</sup>	1.459E-05	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	9.954E-06
K <sup>+</sup>	4.058E-06	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	1.000E-10
H <sup>+</sup>	1.131E-08	LMWN	1.000E-10
Al <sup>3+</sup>	1.000E-18	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.062E-05
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	4.519E-05	NH <sub>3</sub>	3.567E-08
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7.907E-02	PO <sub>4</sub>	1.000E-08
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2.002E-03	BIO	1.000E-10
OH <sup>-</sup>	8.840E-07	BIO_N	1.000E-10
F <sup>-</sup>	1.000E-10	HUM_N	1.000E-10
A <sup>-</sup>	1.000E-10	BIO_P	1.000E-10
AlA <sup>2+</sup>	4.875E-22	HUM_P	1.000E-10
AlF <sup>2+</sup>	1.047E-21	LMWP	1.000E-10
AlF <sub>2</sub> <sup>+</sup>	5.754E-26	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	7.184E-07
AlF <sub>3</sub>	1.072E-31	Oxalate	1.000E-10
AlF <sub>4</sub> <sup>-</sup>	5.370E-39	CaCO <sub>3</sub> (s)	5.000E-02
AlF <sub>5</sub> <sup>2-</sup>	8.318E-48	CaSO <sub>4</sub> (s)	5.000E-02
AlH <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	1.450E-21	Al(OH) <sub>3</sub> (s)	0.000E+00
AlHA <sup>3+</sup>	6.785E-18	SO-H	1.000E-30
AlOH <sup>2+</sup>	9.046E-16	X-Al	1.000E-22
Al(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup>	5.794E-13	SO	2.874E-26
Al(OH) <sub>3</sub>	4.359E-10	SO-H <sub>2</sub>	1.421E-32
Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>	6.108E-10	SO-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.968E-30
AlSO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	8.091E-17	X-Ca	6.673E-08
Al(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	4.966E-16	X-Mg	5.442E-08
H <sub>2</sub> A <sup>+</sup>	4.046E-14	X-K	3.184E-08
H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7.464E-17	X-Na	1.886E-08
H <sub>3</sub> A <sup>2+</sup>	9.132E-20		

### Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής κατά Penman–Monteith

Η εξίσωση Penman–Monteith (2.1) υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή σε m d<sup>-1</sup> χρησιμοποιώντας ημερήσιες μετρήσεις μέσης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας (°C) (Διάγραμμα 2.3), μέσης ταχύτητας ανέμου (m s<sup>-1</sup>) (Διάγραμμα 2.4), ολικής καθαρής ενέργειας ακτινοβολίας (MJ m<sup>-2</sup>) (Διάγραμμα 2.5), μέγιστης και ελάχιστης υγρασίας (%) που θεωρήθηκαν ίσες και άλλων παραμέτρων που αναλύονται ενδελεχώς παρακάτω.

$$\lambda ET = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2.1)$$

όπου,

- λET: η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>)

- $\Delta$ : η κλίση της καμπύλης της τάσης ατμών ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
- $R_n$ : η καθαρή ακτινοβολία ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )
- $G$ : η ροή θερμότητας του εδάφους= 0  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$
- $e_s - e_a$ : το έλλειμμα πίεσης υδρατμών του αέρα ( $\text{kPa}$ )
- $\rho_a$ : η μέση πυκνότητα του αέρα σε σταθερή πίεση= 1.1  $\text{kg m}^{-3}$
- $C_p$ : η ειδική θερμοχωρητικότητα αέρα= 0.001  $\text{MJ kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$
- $\gamma$ : ψυχρομετρική σταθερά ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
- $r_s$ : η επιφανειακή αντίσταση ( $\text{d m}^{-1}$ )
- $r_a$ : η αεροδυναμική αντίσταση ( $\text{d m}^{-1}$ )

Η κλίση της καμπύλης τάσης ατμών,  $\Delta$  ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\Delta = \frac{4,098 \left( 0.618 e^{\frac{17.27 T_{\text{mean}}}{237.3 + T_{\text{mean}}}} \right)}{(T_{\text{mean}} + 273.3)^2} \quad (2.2)$$

όπου,

- $T_{\text{mean}}$ : η μέση θερμοκρασία του αέρα σε  $^\circ\text{C}$

Η πίεση ατμών κορεσμού  $e_s$  ( $\text{kPa}$ ) υπολογίζεται από τον τύπο:  $e_s = \frac{e_{T_{\text{max}}} + e_{T_{\text{min}}}}{2}$  (2.3)

όπου,

- $e_{T_{\text{max}}}$ : η πίεση ατμών κορεσμού στη μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία ( $\text{kPa}$ )

$$e_{T_{\text{max}}} = 0.608 e^{\frac{17.27 T_{\text{max}}}{237.3 + T_{\text{max}}}}$$

- $e_{T_{\text{min}}}$  η πίεση ατμών κορεσμού στην ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία ( $\text{kPa}$ )

$$e_{T_{\text{min}}} = 0.608 e^{\frac{17.27 T_{\text{min}}}{237.3 + T_{\text{min}}}}$$

Η πραγματική πίεση ατμών  $e_a$  ( $\text{kPa}$ ) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$e_a = \frac{e_{T_{\text{min}}} \frac{RH_{\text{max}}}{100} + e_{T_{\text{max}}} \frac{RH_{\text{min}}}{100}}{2} \quad (2.4)$$

όπου,

- $RH_{\min}$ : η ελάχιστη υγρασία
- $RH_{\max}$ : η μέγιστη υγρασία

Η αεροδυναμική αντίσταση  $r_a$  ( $d\ m^{-1}$ ) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 u_z} \quad (2.5)$$

όπου,

- $z_m$ : το ύψος των μετρήσεων ανέμου= 32 m
- $z_h$ : το ύψος μετρήσεων υγρασίας= 9.5 m
- $d$ : το ύψος μετατόπισης μηδενικού επιπέδου= 2 m
- $z_{om}$ : το μήκος τραχύτητας που διέπει τη μεταφορά ορμής = 0.123 h (m)
- $h$ : το ύψος του φυτού= 29 m
- $z_{oh}$ : το μήκος τραχύτητας που διέπει τη μεταφορά θερμότητας και υδρατμών= 0.1  $z_{om}$  (m)
- $k$ : η σταθερά Von Karman= 0.41
- $u_z$ : η μέση ταχύτητα ανέμου ( $m\ s^{-1}$ )

Η επιφανειακή αντίσταση  $r_s$  ( $d\ m^{-1}$ ) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$r_s = 400 - \frac{200 (LAI - 0.5)}{4.5} \quad (2.6)$$

όπου,

- LAI: ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (leaf area index)

Η ψυχομετρική σταθερά  $\gamma$  ( $kPa\ ^\circ C^{-1}$ ) ισούται με  $\gamma = 0.00066 P$

όπου,

- $P$ : η ατμοσφαιρική πίεση (kPa)



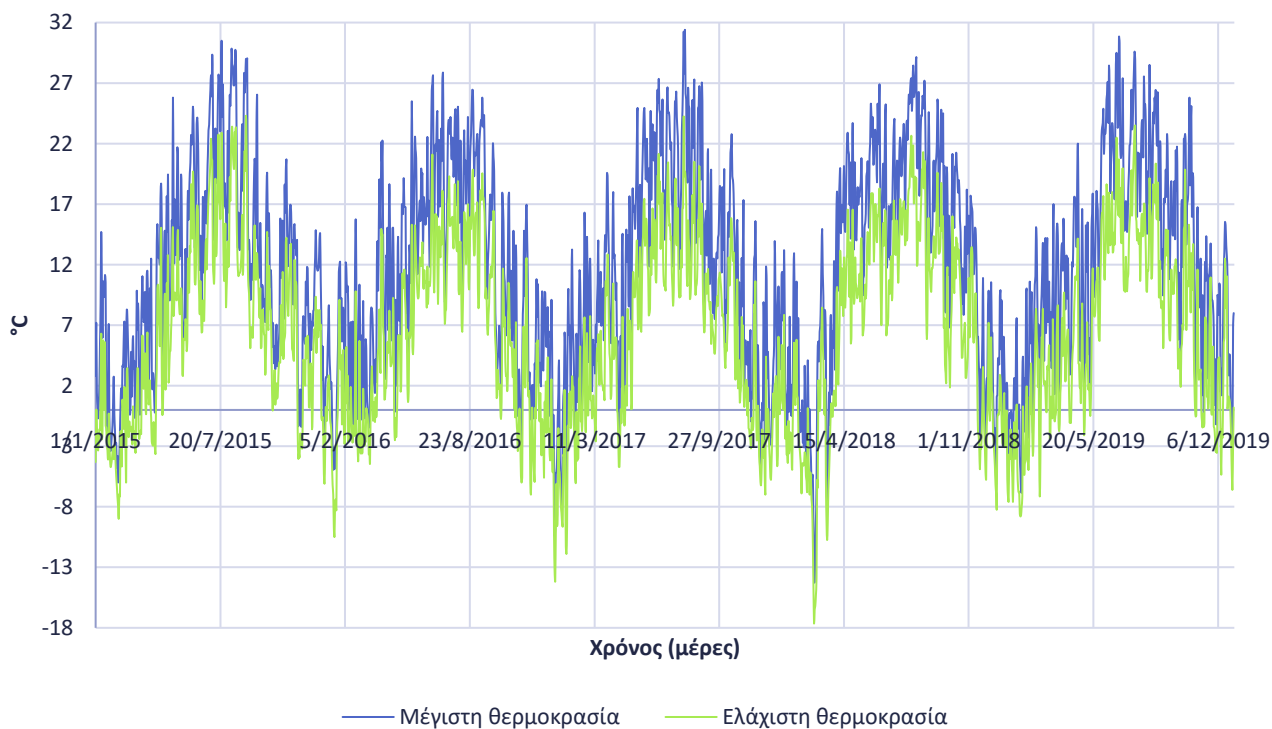
Για την εύρεση της εξατμισοδιαπνοής ET χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$ET \text{ (m d}^{-1}\text{)} = \frac{\frac{\lambda ET \text{ (MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}\text{)}}{\lambda \text{ (MJ kg}^{-1}\text{)}}}{\rho_w \text{ (kg m}^{-3}\text{)}} \quad (2.7)$$

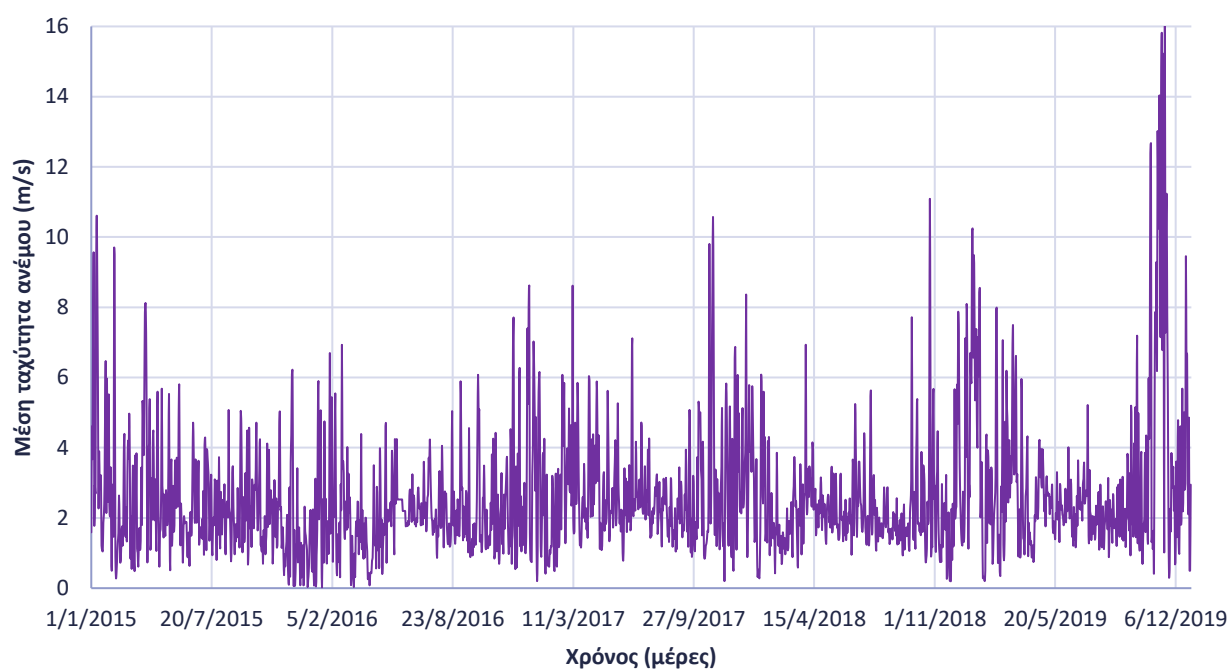
όπου,

- $\lambda$ : η λανθάνουσα θερμότητα (MJ kg<sup>-1</sup>) =  $\frac{2,501 - 2.361 T}{10^3}$
- T: η μέση θερμοκρασία του αέρα (°C)
- $\rho_w$ : η πυκνότητα του νερού = 1,000 kg m<sup>-3</sup>

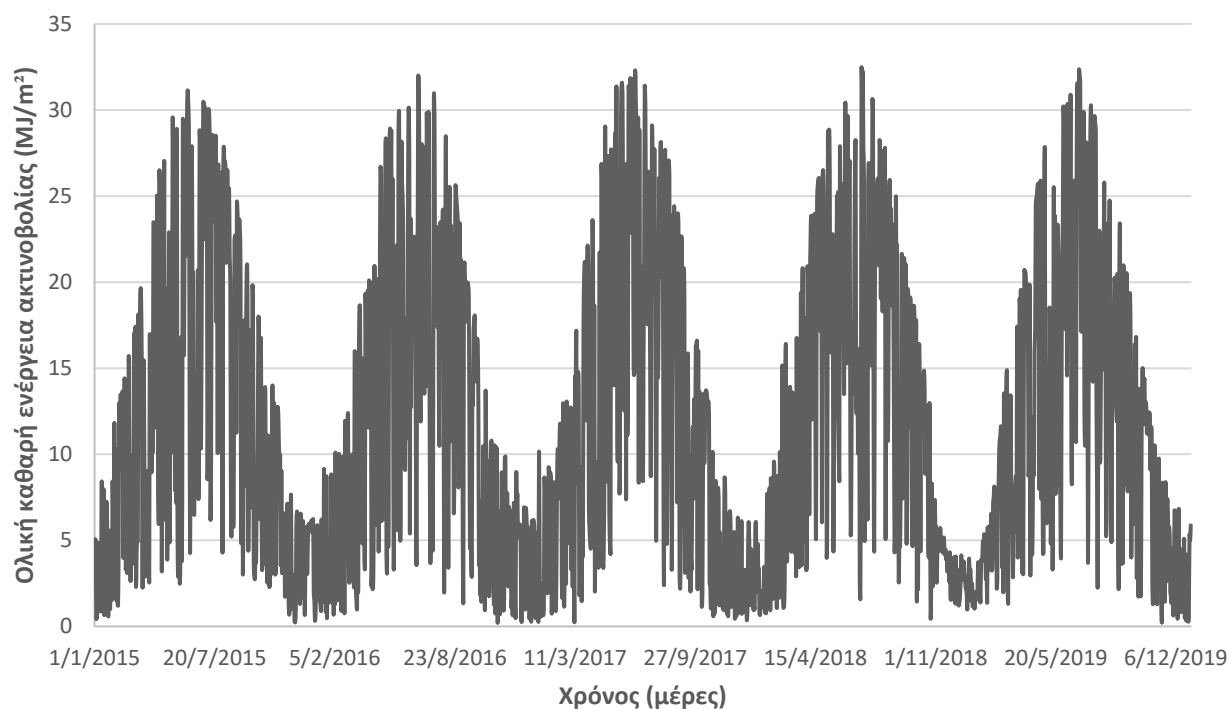
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η χρονοσειρά της εξατμισοδιαπνοής που χρησιμοποιήθηκε στην αρχικοποίηση του μοντέλου HYDRUS-1D προέκυψε από τον συνδυασμό των μετρήσεων ροής λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης (latent heat flux) και των υπολογιζόμενων τιμών εξατμισοδιαπνοής κατά Penman–Monteith. Πιο συγκεκριμένα, για τις ημέρες που υπήρξαν δεδομένα ροής λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης χρησιμοποιήθηκαν αυτά και έπειτα για τις υπόλοιπες ημέρες συμπληρώθηκαν οι τιμές της εξατμισοδιαπνοής που υπολογίστηκαν με την μέθοδο Penman–Monteith.



Διάγραμμα 2.3. Ημερήσια μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία (°C)



Διάγραμμα 2.4. Μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου ( $m s^{-1}$ )



Διάγραμμα 2.5. Ημερήσια ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας ( $MJ m^{-2}$ )

### 2.2.2. Αρχικοποίηση μοντέλου CAST για 60 μήνες

Το μοντέλο CAST (Coupled carbon, Aggregation, Structure Model) προσομοιώνει τον σχηματισμό συσσωματωμάτων και τη δυναμική των θρεπτικών συστατικών C/N/P/K/Ca. Εξετάζει τρεις τύπους συσσωματωμάτων: α) τα μακρο-συσσωματώματα μεγέθους >250μm (AC3), β) τα μικρο-συσσωματώματα μεγέθους 53-250μm (AC2) και γ) τα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου μεγέθους <53μm (AC1) χρησιμοποιώντας τις δεξαμενές άνθρακα του μοντέλου RothC-26.3 (DPM, RPM, BIO, HUM και IOM).

Για την αρχικοποίηση του μοντέλου CAST το εδαφικό προφίλ διακρίνεται σε τρία στρώματα βάθους: <20cm, 20-40cm και >40cm σύμφωνα με το μοντέλο 1D-ICZ. Εφόσον δεν υπάρχουν δεδομένα κλασματοποίησης (fractionation) των υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA), για κάθε τύπο συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3) κάθε εδαφικού στρώματος επιλέχθηκαν οι τιμές που παρουσιάζονται στους Πίνακες 2.2, 2.3 και 2.4 αντίστοιχα. Επιπλέον, η κατανομή των σωματιδίων-συσσωματωμάτων μεγέθους ιλύος-αργίλου (<53μm) και μεγέθους άμμου στα AC1, AC2 and AC3 παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.5. Ο λόγος της αποσυνθέσιμης φυτικής ύλης (DPM) προς την ανθεκτική στην αποσύνθεση φυτική ύλη (RPM) ορίστηκε στο 0.25 επειδή το οικοσύστημα που μελετάται είναι δασικό. Τέλος, βασικές παράμετροι του μοντέλου CAST αποτελούν το πορώδες (porosity), η φαινόμενη πυκνότητα (bulk density), το περιεχόμενο σε άργιλο (clay content) και το περιεχόμενο ιλύος-αργίλου (silt-clay) (Πιν.2.6).

Πίνακας 2.2. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα (tC ha<sup>-1</sup>) στον τύπο συσσωματωμάτων AC1

	AC1	
Βάθος εδάφους	BIO	HUM
<20cm	1.23	4.73
20-40cm	1.21	4.30
>40cm	1.14	4.62

Πίνακας 2.3. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα (tC ha<sup>-1</sup>) στον τύπο συσσωματωμάτων AC2

	AC2			
Βάθος εδάφους	RPMf	DPMf	BIO	HUM
<20cm	5.31	5.31	1.77	9.65
20-40cm	5.06	5.06	1.71	8.56
>40cm	3.09	3.09	1.49	6.26

Πίνακας 2.4. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα ( $\text{tC ha}^{-1}$ ) στον τύπο συσσωματωμάτων AC3

	AC3									
	AC3				AC1 εντός των AC3		AC2 εντός των AC3			
Βάθος εδάφους	RPMc	DPMc	RPMf	DPMf	BIO	HUM	RPMf	DPMf	BIO	HUM
<20cm	9.51	2.03	1.00	2.00	0.68	12.87	1.69	1.69	0.17	3.22
20-40cm	8.65	1.88	0.50	1.50	0.63	11.90	1.57	1.57	0.16	2.98
>40cm	6.08	1.28	0.20	1.00	0.43	8.13	1.07	1.07	0.11	2.03

Πίνακας 2.5. Κατανομή σωματιδίων μεγέθους ιλύος-αργίλου και μεγέθους άμμου στα AC1, AC2, AC3

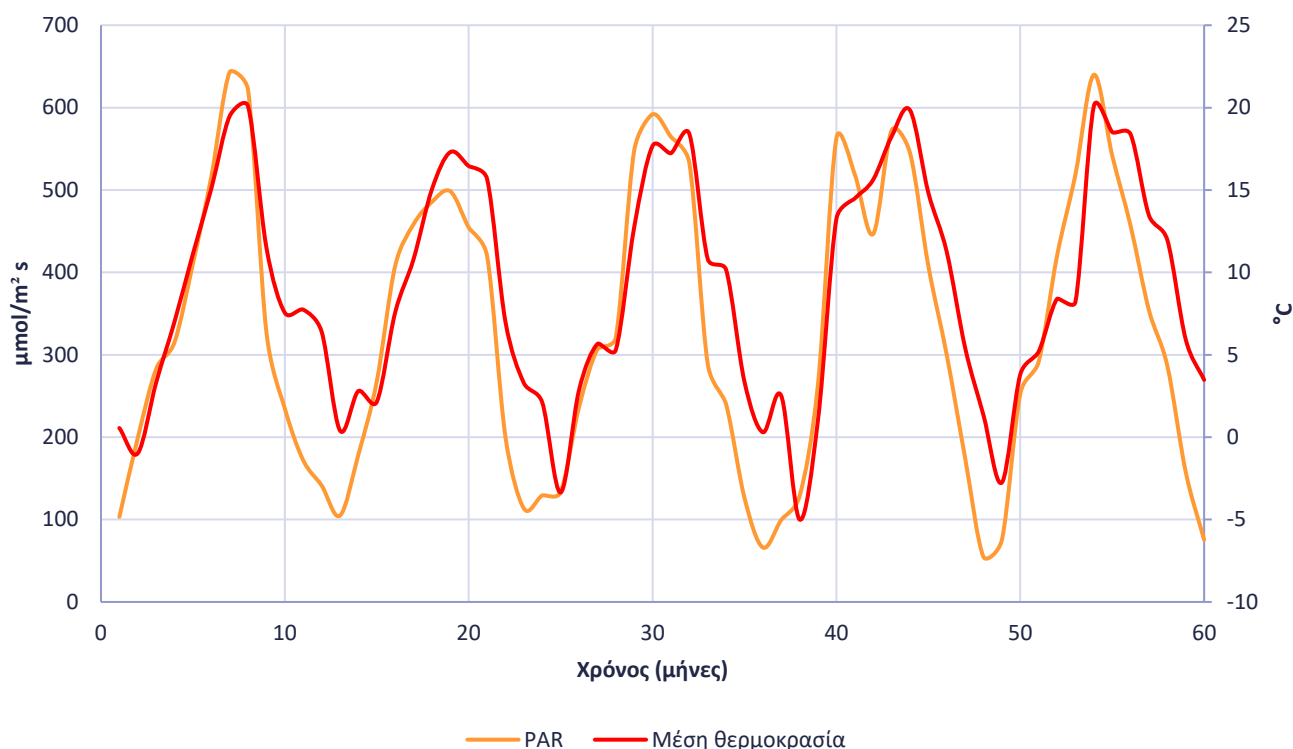
Βάθος εδάφους	Κατανομή σωματιδίων μεγέθους ιλύος-αργίλου (%)				Κλάσμα σωματιδίων μεγέθους άμμου	
	AC1	AC2	AC1 εντός των AC3	AC2 εντός των AC3	Κλάσμα άμμου εντός των AC2	Κλάσμα άμμου εντός των AC3
<20cm	24.87	37.18	20.77	17.19	0.37	0.63
20-40cm	26.73	39.55	17.37	16.35	0.33	0.67
>40cm	29.33	43.73	11.96	14.99	0.26	0.74

Πίνακας 2.6. Βασικές παράμετροι αρχικοποίησης CAST

Παράμετρος	Τιμή
Πορώδες	0.35
Φαινόμενη πυκνότητα	$1,213 \text{ kg m}^{-3}$
Περιεχόμενο σε άργιλο (%)	12.44
Περιεχόμενο ιλύος-αργίλου (%)	63.91

### 2.2.3. Αρχικοποίηση μοντέλου PROSUM για 60 μήνες

Το μοντέλο PROSUM προσομοιώνει τη δυναμική της βιομάζας, δηλαδή την ανάπτυξη της βλάστησης και την απορρόφηση θρεπτικών συστατικών από τα φυτά. Βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την ανάπτυξη και την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών είναι: η μέση θερμοκρασία, η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR, Photosynthetically Active Radiation) (Πίν.Π2.3, Διάγραμμα 2.6), η συγκέντρωση του  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα, οι μέθοδοι διαχείρισης (άροση, συγκομιδή), το είδος των φυτών (3) καθώς και η εισροή νερού και θρεπτικών συστατικών από τα υπόλοιπα μοντέλα. Η συγκέντρωση του  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα ορίστηκε στα  $395 \text{ } \mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1}$  αέρα και γεγονότα άροσης και συγκομιδής δεν λαμβάνουν χώρα.



Διάγραμμα 2.6. PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) και μέση θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 2.2.4. Βαθμονόμηση 1D-ICZ για 60 μήνες

Η βαθμονόμηση του μονοδιάστατου μοντέλου ολοκληρωμένης κρίσιμης ζώνης (1D-ICZ) επιτεύχθηκε με τη χρήση επαναληπτικής μεθοδολογίας. Αρχικά βαθμονομήθηκε το μοντέλο μεταβολής βιομάζας PROSUM, στη συνέχεια το μοντέλο σχηματισμού συσσωματωμάτων και δυναμικής θρεπτικών συστατικών CAST και τέλος, οι διαλυτές ουσίες του εδαφικού διαλύματος μέσω των μοντέλων HYDRUS και SAFE. Οι πιο ευαίσθητες παράμετροι βαθμονόμησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.7.

Όσον αφορά το μοντέλο PROSUM, αξίζει να σημειωθεί ότι η βαθμονόμηση του έγινε βάσει μετρήσεων του είδους δέντρου *Picea abies*, το οποίο αποτελεί ένα εκ των δύο ειδών δέντρου που βρίσκονται σε αφθονία στο δασικό οικοσύστημα Zöbelboden. Παρατηρήθηκε ότι ο περιοριστικός παράγοντας της φυτικής παραγωγής είναι ο φώσφορος (P) και έτσι ρυθμίζοντας τις συγκεντρώσεις των φωσφορικών ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) του εδαφικού διαλύματος και της χημείας της βροχής προσαρμόστηκαν οι μεταβολές της βιομάζας C (total biomass,  $\text{mol m}^{-2}$ ) του *Picea abies* έτσι ώστε να συνάδουν με τις διαθέσιμες μετρήσεις.

Στο μοντέλο CAST βαθμονομήθηκαν τα αποθέματα εδαφικού οργανικού άνθρακα (SOC) και του άνθρακα στα υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA). Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η απουσία δεδομένων κλασματοποίησης των υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA fractionation) είχε ως αποτέλεσμα τη χρήση μετρήσεων του εδαφικού οργανικού άνθρακα (SOC) του πρώτου στρώματος ( $70 \text{ t C ha}^{-1}$ ) και την

κλασματοποίηση αυτού στους διάφορους παράγοντες σχηματισμού και καταστροφής συσσωματωμάτων (AC3, AC1 within AC3, AC2 within AC3, AC2, AC1, RPM<sub>c</sub>, DPM<sub>c</sub>, RPM<sub>f</sub>, DPM<sub>f</sub>, BIO, HUM). Με την επαναληπτική διαδικασία κλασματοποίησης, σκοπός ήταν η διατήρηση του ρυθμού του SOC του 1<sup>ου</sup> στρώματος στους 70 t C ha<sup>-1</sup> και επίσης, η σταθερότητα των AC1 για κάθε ένα από τα τέσσερα στρώματα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η συσσωμάτωση.

Όσον αφορά τις διαλυτές ουσίες του εδαφικού διαλύματος (soil chemistry), οι συγκεντρώσεις των Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> κ.α. βαθμονομήθηκαν με τη βοήθεια α) του μοντέλου κινητικής διάλυσης ορυκτών (SAFE Weathering) μέσω του δολομίτη (dolomite) και β) της χημικής ισορροπίας μέσω των στερεών CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub> κ.α. Η διαδικασία βαθμονόμησης εφαρμόστηκε επαναληπτικά έως ότου να υπάρχει μια καλή προσαρμογή με τις διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου.

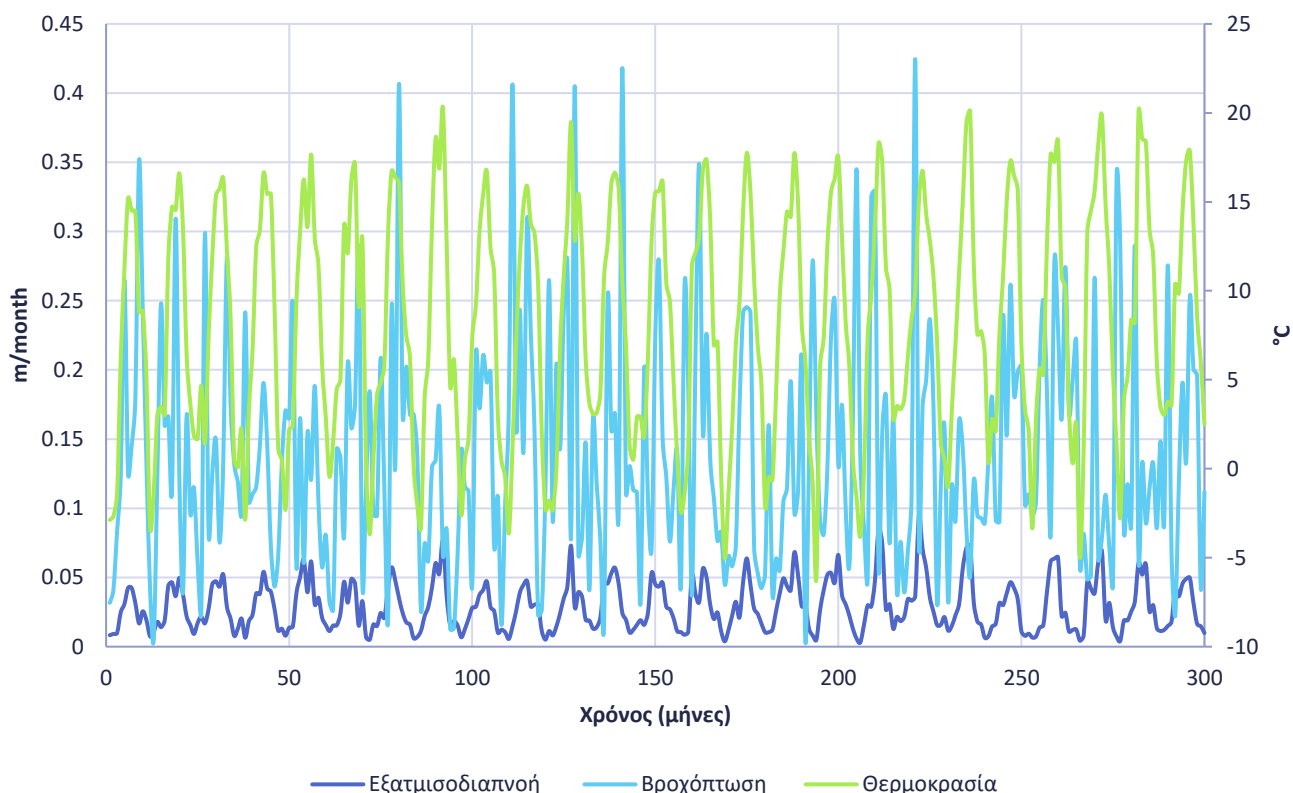
Πίνακας 2.7. Ευαίσθητες παράμετροι βαθμονόμησης

Παράμετρος	Αρχείο Μοντέλο	Αύξηση (+) ή μείωση (-)	Ρόλος
k_RPMc_AC3_ini	CastCalibrationParameters.xlsx CAST	-	Σταθεροποίηση ρυθμού πτώσης εδαφικού οργανικού άνθρακα (SOC)
k_RPMf_AC3_ini		-	
k_DPMc_AC3_ini		-	
k_DPMf_AC3_ini		-	
k_BIO_AC1_in_AC3_ini		-	
k_HUM_AC1_in_AC3_ini		-	
k_BIO_AC2_in_AC3_ini		-	
k_HUM_AC2_in_AC3_ini		-	
k_RPMf_AC2_in_AC3_ini		-	
k_DPMf_AC2_in_AC3_ini		-	
kweath (dolomite)	weathering.dat SAFE	-	Βαθμονόμηση Ca <sup>2+</sup> εδαφικού διαλύματος
CaCO <sub>3</sub>	solids.csv HYDRUS-1D	+	

### 2.3. Αρχικοποίηση μοντέλου 1D-ICZ για 300 μήνες

Η διαδικασία αρχικοποίησης του μονοδιάστατου μοντέλου κρίσιμης ζώνης (1D-ICZ) επιτυγχάνεται μέσω της αρχικοποίησης των τεσσάρων υπομοντέλων HYDRUS, CAST, PROSUM και SAFE. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε παραμένει ίδια με τη διαδικασία αρχικοποίησης 60 μηνών με μόνη διαφορά, τη χρήση μετρήσεων πεδίου του σταθμού eLTER Zöbelboden για χρονικό διάστημα 25 ετών (1996-2020) δηλαδή, 300 μηνών. Οι οριακές συνθήκες θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής παρουσιάζονται στον Πίνακα Π2.2 (Παράρτημα II) και στο Διάγραμμα 2.7 ενώ οι αρχικές συγκεντρώσεις των διαλυτών ουσιών στον Πίνακα 2.8. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την αρχικοποίηση του μοντέλου CAST παρουσιάζονται στους πίνακες 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 και 2.13. Τέλος, οι αρχικές συνθήκες της μέσης θερμοκρασίας και της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο PROSUM απεικονίζονται στον Πίνακα Π2.4 (Παράρτημα II) και στο Διάγραμμα 2.8.

### 2.3.1. Αρχικοποίηση μοντέλου HYDRUS-1D για 300 μήνες



Διάγραμμα 2.7. Οριακές συνθήκες μηνιαίας θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής

Πίνακας 2.8. Αρχικές συγκεντρώσεις διαλύματος στο έδαφος

Χημικό είδος	Συγκέντρωση (mol L <sup>-1</sup> )	Χημικό είδος	Συγκέντρωση (mol L <sup>-1</sup> )
Ca <sup>2+</sup>	4.072E-04	H <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1.479E-12
Mg <sup>2+</sup>	4.031E-04	HA	2.344E-10
Na <sup>+</sup>	1.022E-05	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	8.132E-06
K <sup>+</sup>	1.771E-06	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	1.000E-10
H <sup>+</sup>	2.344E-08	LMWN	1.000E-10
Al <sup>3+</sup>	1.000E-18	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.597E-05
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1.586E-04	NH <sub>3</sub>	6.624E-07
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	6.460E-02	PO <sub>4</sub>	1.000E-08
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.390E-03	BIO	1.000E-10
OH <sup>-</sup>	4.266E-07	BIO_N	1.000E-10
F <sup>-</sup>	1.737E-06	HUM_N	1.000E-10
A <sup>-</sup>	1.000E-10	BIO_P	1.000E-10
AlA <sup>2+</sup>	4.875E-22	HUM_P	1.000E-10
AlF <sup>2+</sup>	1.819E-17	LMWP	1.000E-10
AlF <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1.736E-17	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	2.765E-05
AlF <sub>3</sub>	5.614E-19	Oxalate	1.000E-10
AlF <sub>4</sub> <sup>-</sup>	4.887E-22	CaCO <sub>3</sub> (s)	5.000E-02
AlF <sub>5</sub> <sup>2-</sup>	1.315E-26	CaSO <sub>4</sub> (s)	5.000E-02
AlH <sub>3</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	6.998E-22	Al(OH) <sub>3</sub> (s)	0.000E+00

AlHA <sup>3+</sup>	1.406E-17	SO-H	1.000E-30
AlOH <sup>2+</sup>	4.365E-16	X-Al	1.000E-22
Al(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1.349E-13	SO	1.387E-26
Al(OH) <sub>3</sub>	4.898E-11	SO-H <sub>2</sub>	2.944E-32
Al(OH) <sub>4</sub> <sup>-</sup>	3.311E-11	SO-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5.026E-30
AlSO <sub>4</sub> <sup>+</sup>	6.610E-17	X-Ca	8.168E-08
Al(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	3.314E-16	X-Mg	5.245E-08
H <sub>2</sub> A <sup>+</sup>	1.738E-13	X-K	1.390E-08
H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.738E-17	X-Na	1.322E-08
H <sub>3</sub> A <sup>2+</sup>	8.128E-19		

### 2.3.2. Αρχικοποίηση μοντέλου CAST για 300 μήνες

Πίνακας 2.9. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα (tC ha<sup>-1</sup>) στον τύπο συσσωματωμάτων AC1

	AC1	
Βάθος εδάφους	BIO	HUM
<20cm	1.23	4.73
20-40cm	1.21	4.30
>40cm	1.14	4.62

Πίνακας 2.10. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα (tC ha<sup>-1</sup>) στον τύπο συσσωματωμάτων AC2

	AC2			
Βάθος εδάφους	RPMf	DPMf	BIO	HUM
<20cm	5.31	5.31	1.77	9.65
20-40cm	5.06	5.06	1.71	8.56
>40cm	3.09	3.09	1.49	6.26

Πίνακας 2.11. Κατανομή δεξαμενών οργανικού άνθρακα (tC ha<sup>-1</sup>) στον τύπο συσσωματωμάτων AC3

	AC3									
	AC3				AC1 εντός των AC3		AC2 εντός των AC3			
Βάθος εδάφους	RPMc	DPMc	RPMf	DPMf	BIO	HUM	RPMf	DPMf	BIO	HUM
<20cm	10.51	3.03	1.00	3.00	0.68	13.87	2.69	2.69	1.17	4.22
20-40cm	8.65	1.88	0.50	1.50	0.63	11.90	1.57	1.57	0.16	2.98
>40cm	6.08	1.28	0.20	1.00	0.43	8.13	1.07	1.07	0.11	2.03



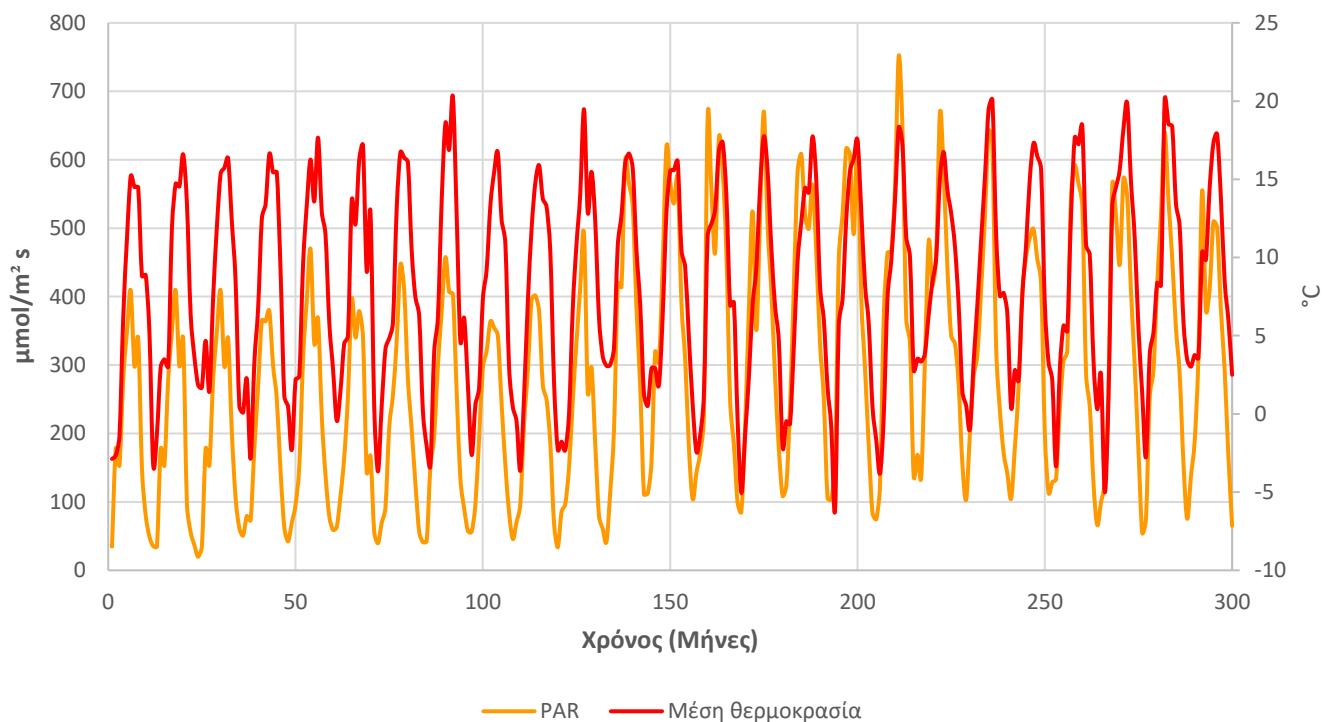
Πίνακας 2.12. Κατανομή σωματιδίων μεγέθους ιλύος-αργίλου και μεγέθους άμμου στα AC1, AC2, AC3

Βάθος εδάφους	Κατανομή σωματιδίων μεγέθους ιλύος-αργίλου (%)				Κλάσμα σωματιδίων μεγέθους άμμου	
	AC1	AC2	AC1 εντός των AC3	AC2 εντός των AC3	Κλάσμα άμμου εντός των AC2	Κλάσμα άμμου εντός των AC3
<20cm	36.70	18.50	25.00	25.00	0.35	0.65
20-40cm	50.00	15.00	25.00	25.00	0.35	0.65
>40cm	60.00	15.00	25.00	25.00	0.35	0.65

Πίνακας 2.13. Βασικές παράμετροι αρχικοποίησης CAST

Παράμετρος	Τιμή
Πορώδες	0.35
Φαινόμενη πυκνότητα	1,213 kg m <sup>-3</sup>
Περιεχόμενο σε άργιλο (%)	12.44
Περιεχόμενο ιλύος-αργίλου (%)	63.91

### 2.3.3. Αρχικοποίηση μοντέλου PROSUM για 300 μήνες



#### 2.3.4. Βαθμονόμηση 1D-ICZ για 300 μήνες

Η επαναληπτική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση του 1D-ICZ 300 μηνών είναι ίδια με τη διαδικασία βαθμονόμησης του 1D-ICZ 60 μηνών. Ειδικότερα, αρχικά βαθμονομήθηκε το μοντέλο μεταβολής βιομάζας PROSUM και κατόπιν, το μοντέλο σχηματισμού συσσωματωμάτων και δυναμικής θρεπτικών συστατικών CAST.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου PROSUM έγινε βάσει μετρήσεων του είδους δέντρου *Picea abies*, το οποίο αποτελεί ένα εκ των δύο ειδών δέντρου που βρίσκονται σε αφθονία στο δασικό οικοσύστημα Zöbelboden. Ο βασικός περιορισμός της φυτικής ανάπτυξης είναι ο φώσφορος (P) και έτσι ρυθμίστηκαν οι συγκεντρώσεις των φωσφορικών ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) του εδαφικού διαλύματος και της χημείας της βροχής με απώτερο στόχο την προσαρμογή των μεταβολών της βιομάζας C (total biomass,  $\text{mol m}^{-2}$ ) του *Picea abies* έτσι ώστε να συνάδουν με τις διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου.

Στο μοντέλο CAST βαθμονομήθηκαν τα αποθέματα εδαφικού οργανικού άνθρακα (SOC) και του άνθρακα στα υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA). Η απουσία δεδομένων κλασματοποίησης των υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA fractionation) είχε ως αποτέλεσμα τη χρήση μετρήσεων του εδαφικού οργανικού άνθρακα (SOC) του πρώτου στρώματος ( $70 \text{ tC ha}^{-1}$ ) και την κλασματοποίηση αυτού στους διάφορους παράγοντες σχηματισμού και καταστροφής συσσωματωμάτων (AC3, AC1 within AC3, AC2 within AC3, AC2, AC1,  $\text{RPM}_c$ ,  $\text{DPM}_c$ ,  $\text{RPM}_f$ ,  $\text{DPM}_f$ , BIO, HUM). Με την επαναληπτική διαδικασία κλασματοποίησης, σκοπός ήταν η διατήρηση του ρυθμού του SOC του 1<sup>ου</sup> στρώματος στους  $70 \text{ tC ha}^{-1}$  και επίσης, η σταθερότητα των AC1 για κάθε ένα από τα τέσσερα στρώματα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η συσσωμάτωση.

Τέλος, λόγω έλλειψης ολοκληρωμένης χρονοσειράς μετρήσεων των συγκεντρώσεων διαλυτών ουσιών εντός του εδάφους δεν πραγματοποιήθηκε σύγκριση και βαθμονόμηση της χημείας του εδαφικού διαλύματος για τα έτη 1996-2020.

#### 2.4. Ανάλυση GPP

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η εύρεση παραγόντων που επηρεάζουν την ακαθάριστη πρωτογενή παραγωγή (GPP, Gross Primary Production). Σε αυτή την ανάλυση θα μελετηθούν 1) η επίδραση του φαινομένου της ξηρασίας στην GPP, 2) η επίδραση της ξηρασίας στην ανθεκτικότητα (resilience) της GPP και 3) η επίδραση αλλαγής δομής του εδάφους (soil structure) στην GPP.

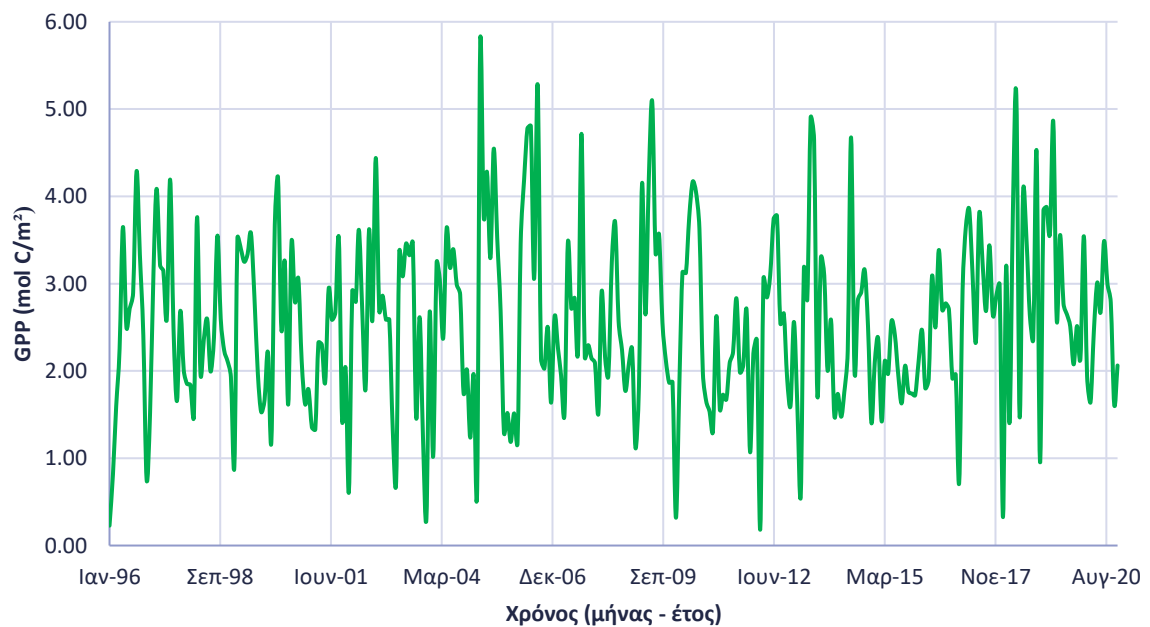
##### 2.4.1. Μελέτη επίδρασης ξηρασίας στην GPP

Αρχικά, για να είναι εφικτή η μελέτη επίδρασης της ξηρασίας στην GPP κρίνεται απαραίτητη η εύρεση ξηρασίας στο χρονικό διάστημα 25 ετών (1996-2020), δηλαδή 300 μηνών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του μετεωρολογικού δείκτη ξηρασίας RDI (Reconnaissance Drought Index) και συγκεκριμένα του Standardized RDI (Πιν.Π4.1, Διαγρ.2.9). Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται μέσω του λογισμικού DrinC (Drought indices Calculator) όπως παρουσιάζεται στο Παράρτημα III. Ο RDI υπολογίζεται για κάθε

υδρολογικό έτος βάσει της κατανομής γάμμα, με μηνιαίο βήμα και περίοδο αναφοράς τους 12 μήνες. Η διακύμανση της ακαθάριστης πρωτογενούς παραγωγής (GPP) παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.10.



Διάγραμμα 2.9. Standardized RDI



Διάγραμμα 2.10. Διακύμανση της GPP ( $\text{mol C m}^{-2}$ ) σε περίοδο 25 ετών

Όταν ο RDI παίρνει τιμές μικρότερες του -1.5 τότε το οικοσύστημα που μελετάται υφίσταται σημαντική ξηρασία (severe drought). Επομένως, μέσω του Πίνακα Π4.1 (Παράρτημα IV) επιλέγονται οι τιμές του RDI που είναι μικρότερες από -1.5 (γαλάζια κελιά), σημειώνεται το πλήθος τους που ουσιαστικά αποτελεί το πλήθος των μηνών που εμφανίζεται το φαινόμενο της ξηρασίας και στη συνέχεια, υπολογίζονται κάποια μεγέθη που είναι απαραίτητα για τη μελέτη της επίδρασης της ξηρασίας στην GPP. Τα μεγέθη που υπολογίζονται είναι (Πιν.Π4.2):

- $n$ , το πλήθος μηνών με  $RDI < -1.5$
- $\overline{RDI}$ , η μέση τιμή των RDI  $= \frac{\sum RDI}{n}$
- Drought Index, ο δείκτης ξηρασίας  $DI = n \cdot \overline{RDI}$
- Response Index, ο δείκτης ανταπόκρισης που ισούται με το άθροισμα της GPP των 12 μηνών μετά από την περίοδο ξηρασίας

#### 2.4.2. Μελέτη επίδρασης ξηρασίας στην ανθεκτικότητα της GPP

Μετά την μελέτη επίδρασης της ξηρασίας στην GPP, δηλαδή της ανταπόκρισης (response) της GPP σε φαινόμενα ξηρασίας, μελετάται η επίδραση της ξηρασίας στην ανθεκτικότητα (resilience) της GPP. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εκτίμησης του δείκτη ανθεκτικότητας (Resilience Index) που υπολογίζεται ως εξής (Πιν.Π4.3):

$$\text{Resilience Index} = \frac{GPP_{\max}}{GPP_{\max\_ever}} \quad (2.8)$$

όπου,

- $GPP_{\max}$  η μέγιστη τιμή της GPP των 12 μηνών μετά την περίοδο ξηρασίας ( $\text{mol C m}^{-2}$ )
- $GPP_{\max\_ever}$  η μέγιστη τιμή όλων των τιμών GPP ( $\text{mol C m}^{-2}$ )

#### 2.4.3. Μελέτη επίδρασης αλλαγής της δομής του εδάφους στην GPP

Για την εύρεση των επιπτώσεων της αλλαγής της δομής του εδάφους στην GPP εκτελείται ένα σενάριο. Σύμφωνα με το μοντέλο, η απόρριψη φυτικών υπολειμμάτων στο έδαφος (litterfall) κυμαίνεται μεταξύ 2 και 3  $\text{tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ . Εντούτοις, ως σενάριο επιλέχθηκε η προθήκη 3  $\text{tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ , ισόποσα κατανεμημένων στους μήνες Οκτώβριο, Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο κάθε έτους (Πιν.2.14). Ο C που προστίθεται στις εισροές (inputs) του μοντέλου CAST βρίσκεται υπό μορφή κόμποστ, δηλαδή οργανικής ύλης. Έτσι, η προσθήκη οργανικής ύλης έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της δομής του εδάφους δηλαδή, του τρόπου διάταξης των οργανικών και ανόργανων σωματιδίων που οδηγεί στη δημιουργία συσσωματωμάτων. Για την μελέτη της επίδρασης της αλλαγής της δομής στην GPP συγκρίνονται τα μεγέθη:

- GPP
- WUE
- Εδαφική υγρασία

Πίνακας 2.14. Ποσότητα C που προστίθεται (tC ha<sup>-1</sup>)

<b>Μήνας</b>	<b>t C ha<sup>-1</sup></b>
Ιανουάριος	0.75
Φεβρουάριος	0
Μάρτιος	0
Απρίλιος	0
Μάιος	0
Ιούνιος	0
Ιούλιος	0
Αύγουστος	0
Σεπτέμβριος	0
Οκτώβρης	0.75
Νοέμβριος	0.75
Δεκέμβριος	0.75
<b>Ετησίως</b>	<b>3</b>

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

#### 3.1. Μοντέλο 1D-ICZ 60 μηνών

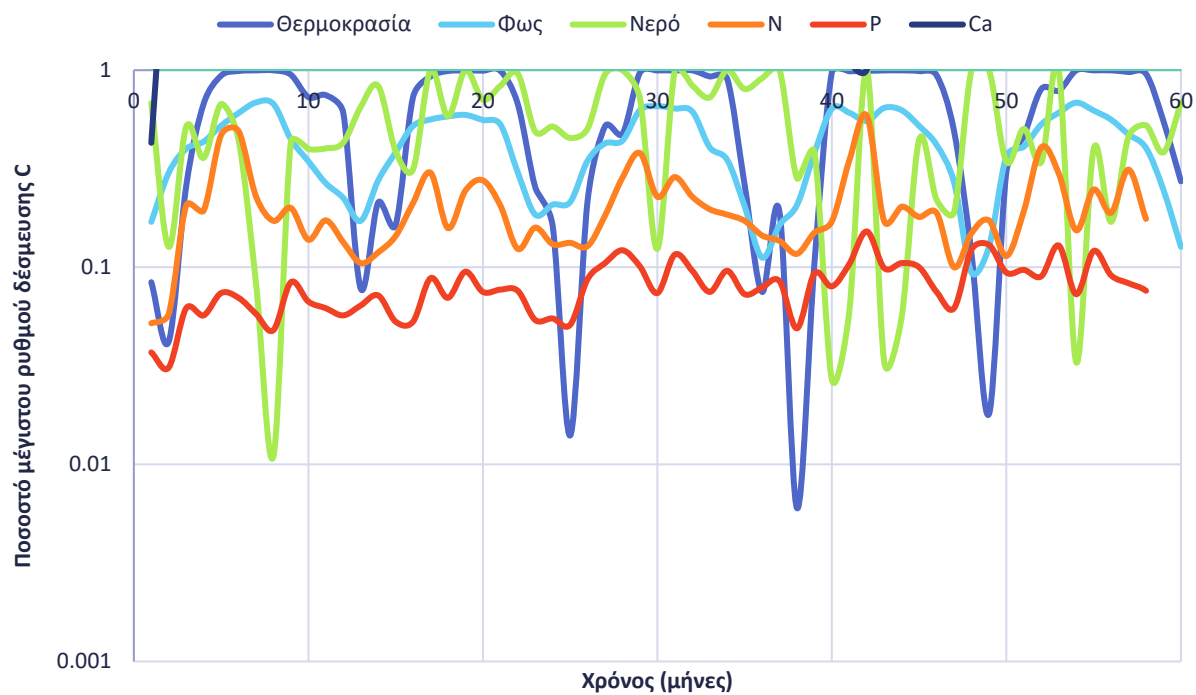
##### 3.1.1. Φυτική Ανάπτυξη

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 3.1. ο κυριότερος περιοριστικός παράγοντας της φυτικής παραγωγής (*Picea abies*) είναι ο φώσφορος (P). Σύμφωνα με τον νόμο του ελαχίστου, το θρεπτικό συστατικό με την μικρότερη διαθεσιμότητα αποτελεί και το συστατικό που επηρεάζει την παραγωγή βιομάζας. Έτσι, η μικρή διαθεσιμότητα φωσφόρου έχει ως αποτέλεσμα την μείωση χρησιμοποίησης των θρεπτικών ουσιών C, N, Ca κ.λπ. η οποία με την σειρά της οδηγεί στην ελάττωση της φυτικής ανάπτυξης, δηλαδή της παραγόμενης βιομάζας. Η πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών C, N, Ca, P, Mg και K παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.3. ενώ η παραγόμενη ολική βιομάζα C και N του είδους δέντρου *Picea abies* στο Διάγραμμα 3.2.

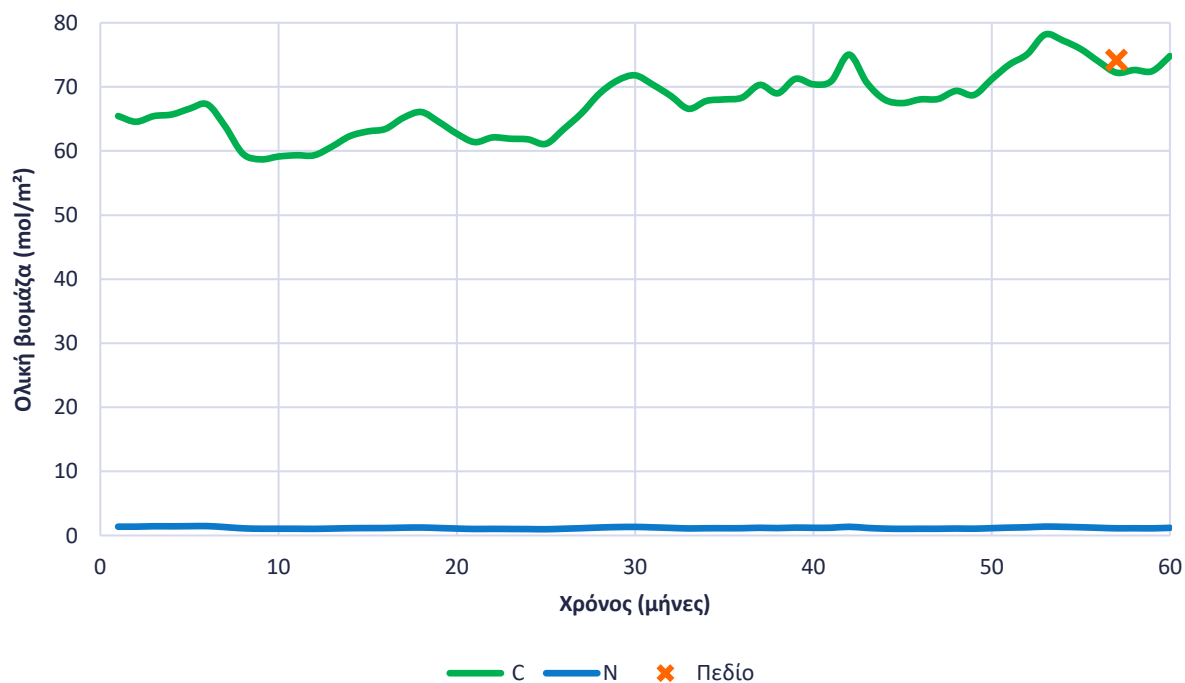
Η μηνιαία παραγωγή C ολικής βιομάζας του είδους δέντρου *Picea abies* παρουσιάζει αυξομειώσεις μεταξύ 58.7 και 78.2 mol m<sup>-2</sup> (Διαγρ.3.2). Αντιθέτως, η μηνιαία παραγωγή N ολικής βιομάζας του διατηρείται πιο σταθερή λαμβάνοντας τιμές από 1.0 έως 1.5 mol m<sup>-2</sup> (Διαγρ.3.2). Σε ετήσια βάση παρατηρείται ότι η παραγωγή C ολικής βιομάζας του *Picea abies* έχει αυξητική τάση με το λιγότερο παραγωγικό έτος να είναι το 2015 ενώ το πιο παραγωγικό έτος να είναι το 2019. Η διαθέσιμη μέτρηση πεδίου ολικής βιομάζας του *Picea abies* (σημείο x διαγράμματος 3.2) με τιμή 74.2 mol C m<sup>-2</sup> αναφέρεται στις 23/09/2019 (μήνας 57) και έχει καλή προσαρμογή με τα αποτελέσματα του μοντέλου.

Σύμφωνα με την προσομοίωση της πρόσληψης των θρεπτικών συστατικών C, N, P, Ca, Mg, K (Διαγρ.3.3) παρατηρείται ότι η τάση χρησιμοποίησης του N ακολουθεί την τάση χρησιμοποίησης του C. Πιο συγκεκριμένα, η πρόσληψη C κυμαίνεται μεταξύ 0.33 και 8.1 mol m<sup>-2</sup> ενώ η πρόσληψη N κυμαίνεται μεταξύ 0.009 και 0.23 mol m<sup>-2</sup>. Επιπροσθέτως, η προσρόφηση των Ca, Mg, P και K κυμαίνεται από 0.001 έως 0.02, 0.001 έως 0.004, 0.001 έως 0.015 και 0.001 έως 0.035 mol m<sup>-2</sup> αντίστοιχα.

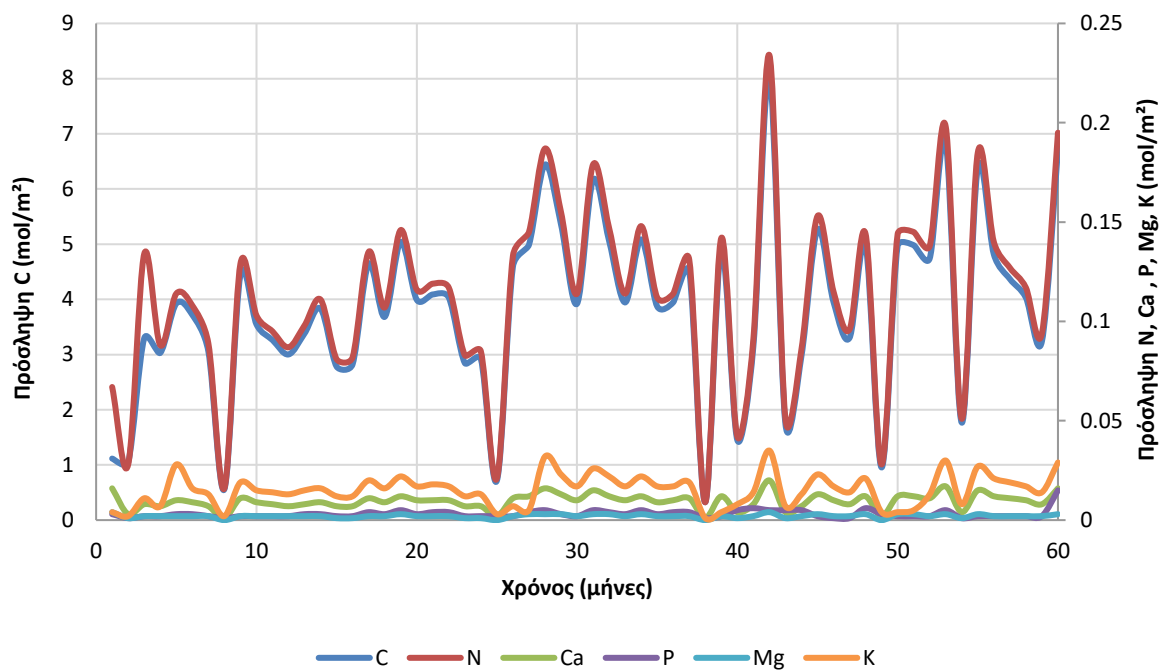
Τα αποθέματα C στο ξυλώδη ιστό, στα φύλλα, στις ρίζες και στις μυκόρριζες του είδους δέντρου *Picea abies* απεικονίζονται στο Διάγραμμα 3.4. ενώ τα αποθέματα N στο ξυλώδη ιστό, στα φύλλα και στις ρίζες του παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3.5. Όσον αφορά τα αποθέματα C του ξυλώδους ιστού, αυτά έχουν αυξητική τάση μεταξύ 38.5 και 51.3 mol m<sup>-2</sup>. Τα αποθέματα N κυμαίνονται από 0.13 έως 0.18 mol m<sup>-2</sup>. Επίσης, τα αποθέματα C και N στα φύλλα παρουσιάζουν διακυμάνσεις μεταξύ 4.6 και 9.7, και 0.14 έως 0.29 mol m<sup>-2</sup> αντίστοιχα. Τα αποθέματα C και N στις ρίζες παρουσιάζουν αυξομειώσεις από 8.6 έως 12.3 και από 0.1 έως 0.14 mol m<sup>-2</sup> αντίστοιχα. Τέλος, τα αποθέματα C στις μυκόρριζες διατηρούνται σχετικά σταθερά στα 6 mol m<sup>-2</sup>.



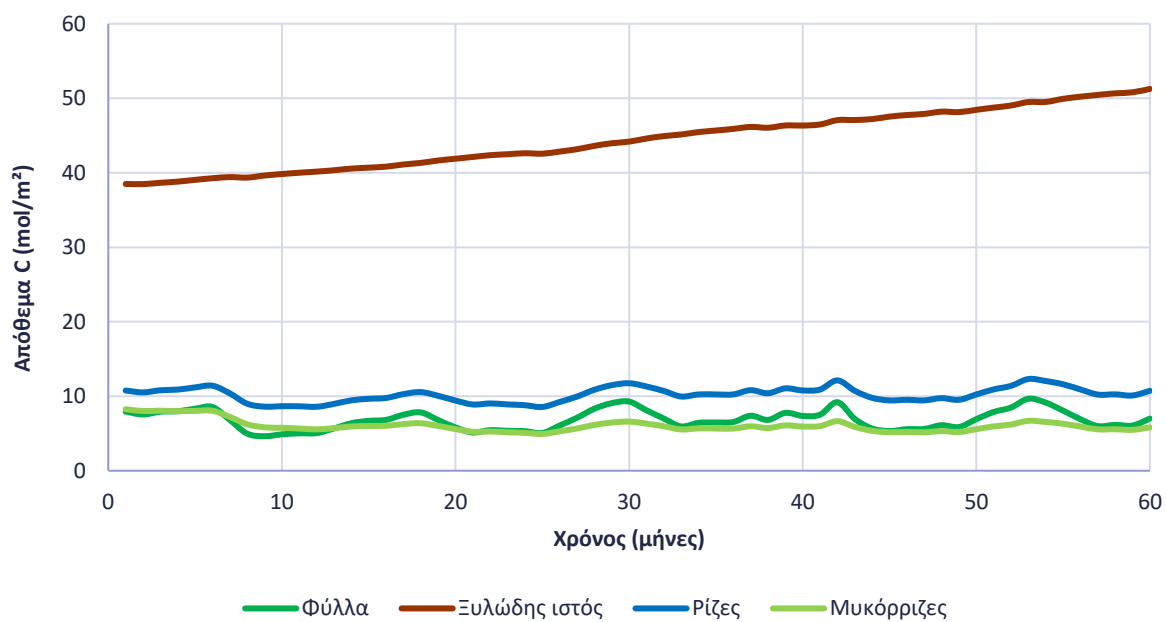
Διάγραμμα 3.1. Περιοριστικοί παράγοντες φυτικής παραγωγής (*Picea abies*)



Διάγραμμα 3.2. Παραγωγή ολικής βιομάζας C και N είδους δέντρου *Picea abies* ( $\text{mol m}^{-2}$ )

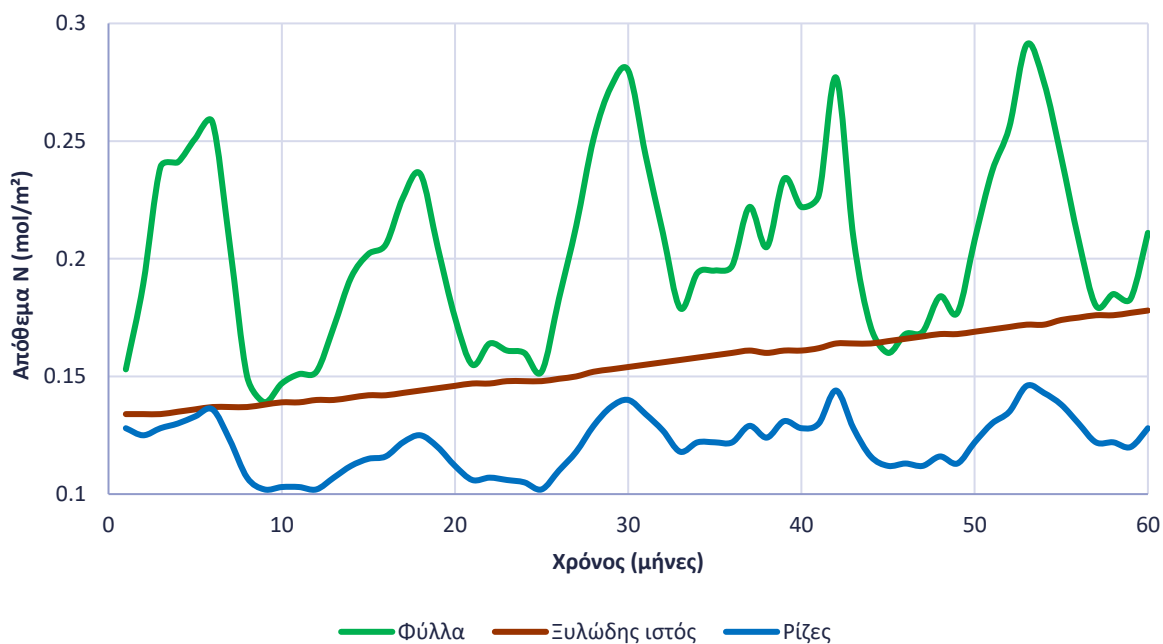


Διάγραμμα 3.3. Πρόσληψη θρεπτικών ουσιών C, N, P, Ca, Mg και K (mol m<sup>-2</sup>)



Διάγραμμα 3.4. Απόθεμα C (mol m<sup>-2</sup>) στα φύλλα, στο ξυλώδη ιστό, στις ρίζες και στις μυκόρριζες του είδους δέντρου *Picea abies*





Διάγραμμα 3.5. Απόθεμα N ( $\text{mol m}^{-2}$ ) στα φύλλα, στο ξυλώδη ιστό και στις ρίζες του είδους δέντρου *Picea abies*

### 3.1.2. Οργανικός άνθρακας (OC) εδάφους, κλασμάτων συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3) και υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA)

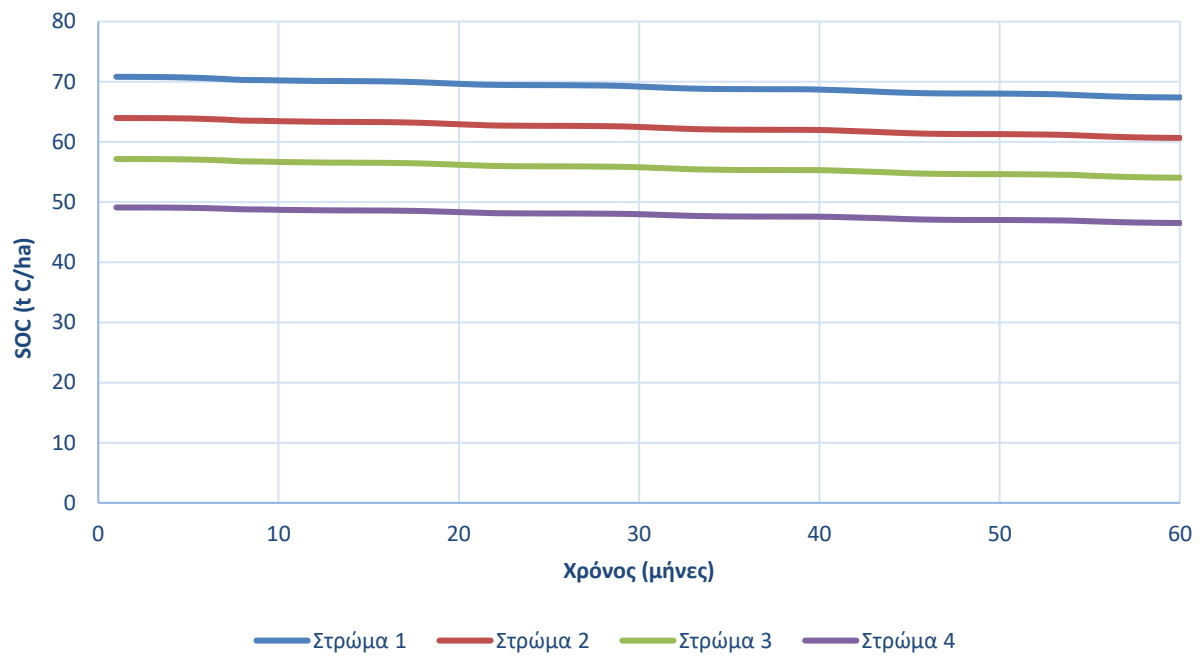
Όπως προαναφέρθηκε, το δασικό οικοσύστημα που μελετάται δεν υπόκεινται σε καμία μέθοδο διαχείρισης π.χ. συγκομιδή, άροση, εισαγωγή λιπασμάτων κλπ. Αυτό σημαίνει ότι η μόνη πηγή C που ενσωματώνεται στο έδαφος είναι τα φυτικά υπολείμματα (litterfall). Έτσι, επειδή το Zöbelboden αποτελεί ένα ώριμο δάσος, ο εδαφικός οργανικός άνθρακας (SOC) θεωρείται ότι παραμένει σταθερός (Διαγρ.3.6). Σύμφωνα με τις παρατηρούμενες μετρήσεις πεδίου, ο οργανικός άνθρακας του 1<sup>ου</sup> εδαφικού στρώματος (0-10 cm) διατηρείται σταθερός στους  $70 \text{ tC ha}^{-1}$  κάτι που προσομοιώνεται με επιτυχία από το μοντέλο 1D-ICZ (Διαγρ.3.6).

Επιπλέον, εκτός του οργανικού άνθρακα όλων των στρωμάτων του εδάφους, το μοντέλο προσομοιώνει τον οργανικό άνθρακα που περιέχεται σε κάθε κλάσμα συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3). Ο οργανικός άνθρακας που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου  $<53\mu\text{m}$  (AC1) παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.7. Ο οργανικός άνθρακας των συσσωματωμάτων μεγέθους  $53-250\mu\text{m}$  (AC2) απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.8 και ο οργανικός άνθρακας των συσσωματωμάτων μεγέθους  $>250\mu\text{m}$  (AC3) απεικονίζεται στο Διάγραμμα 3.9. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι οργανικός άνθρακας όλων των εδαφικών στρωμάτων στα κλάσματα AC1 και AC3 διατηρείται σταθερός ενώ στο κλάσμα AC2 έχει πτωτική τάση.

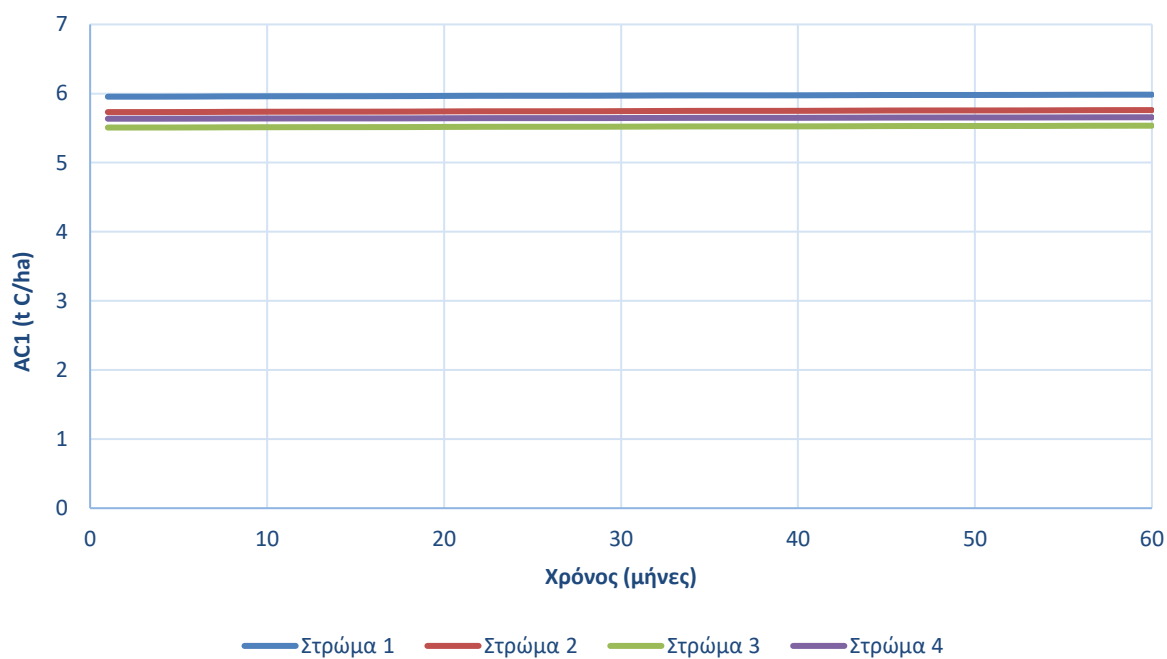
Συμπληρωματικά, μέσω του μοντέλου 1D-ICZ εφικτή γίνεται η εύρεση της μάζας των υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA) σε κάθε ένα από τα κλάσματα συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3). Η μάζα των WSA στα AC1, AC2, AC3 απεικονίζεται στα διαγράμματα 3.10, 3.11, 3.12 αντιστοίχως.

Αξίζει να επισημανθεί ότι λόγω της απουσίας κλασματοποίησης της μάζας του εδάφους δεν υπάρχουν δεδομένα πεδίου για να επιτευχθεί κάποια σύγκριση με τα

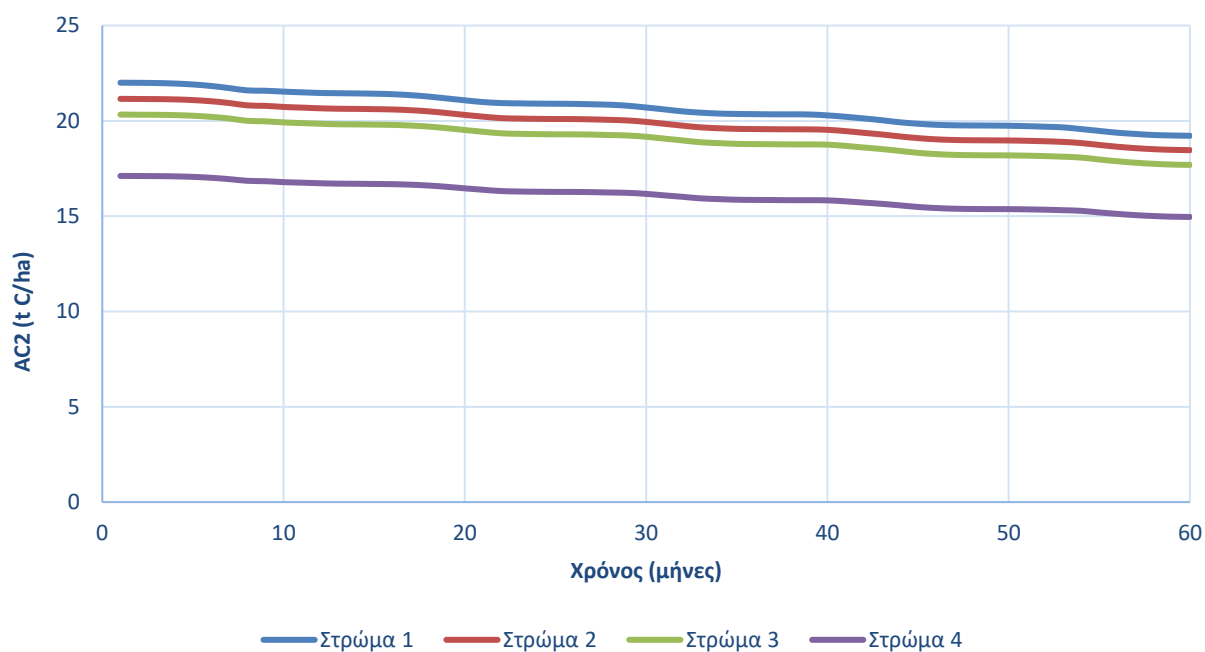
αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο. Ωστόσο, μελλοντικά θα ήταν χρήσιμη η δειγματοληψία μέρους της μάζας του εδάφους του Zöbelboden έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν διαδικασίες όπως η κλασματοποίηση (WSA Fractionation), η διόρθωση άμμου (Sand Correction Procedure) κλπ. με απώτερο στόχο την καλύτερη προσομοίωση της εδαφικής δομής.



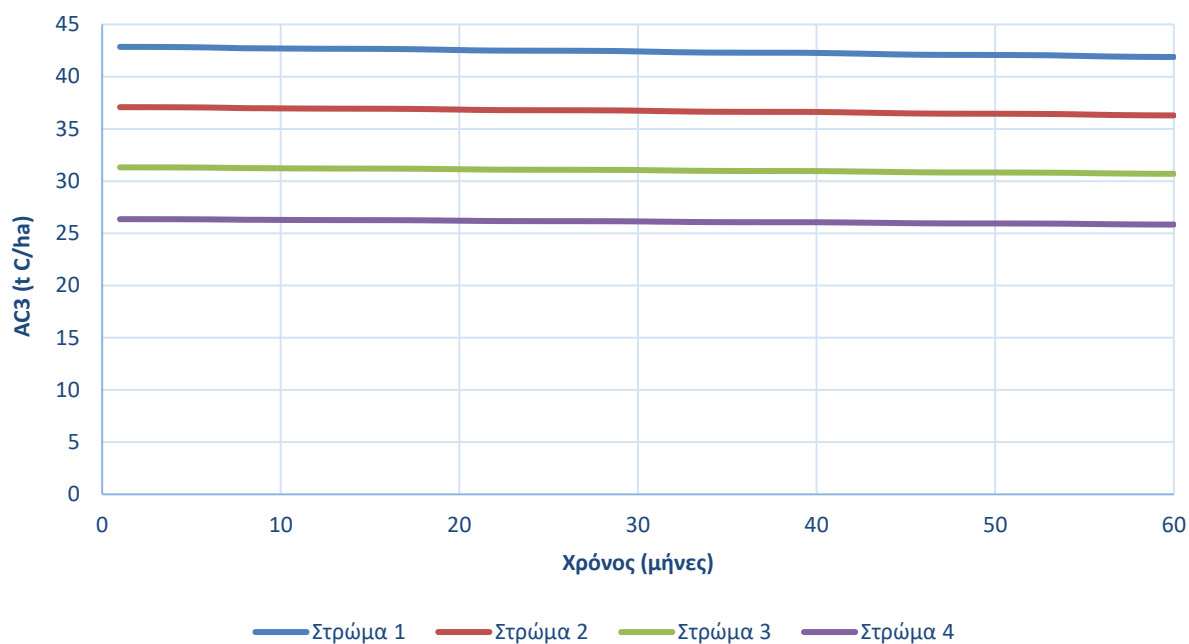
Διάγραμμα 3.6. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) στα τέσσερα εδαφικά στρώματα



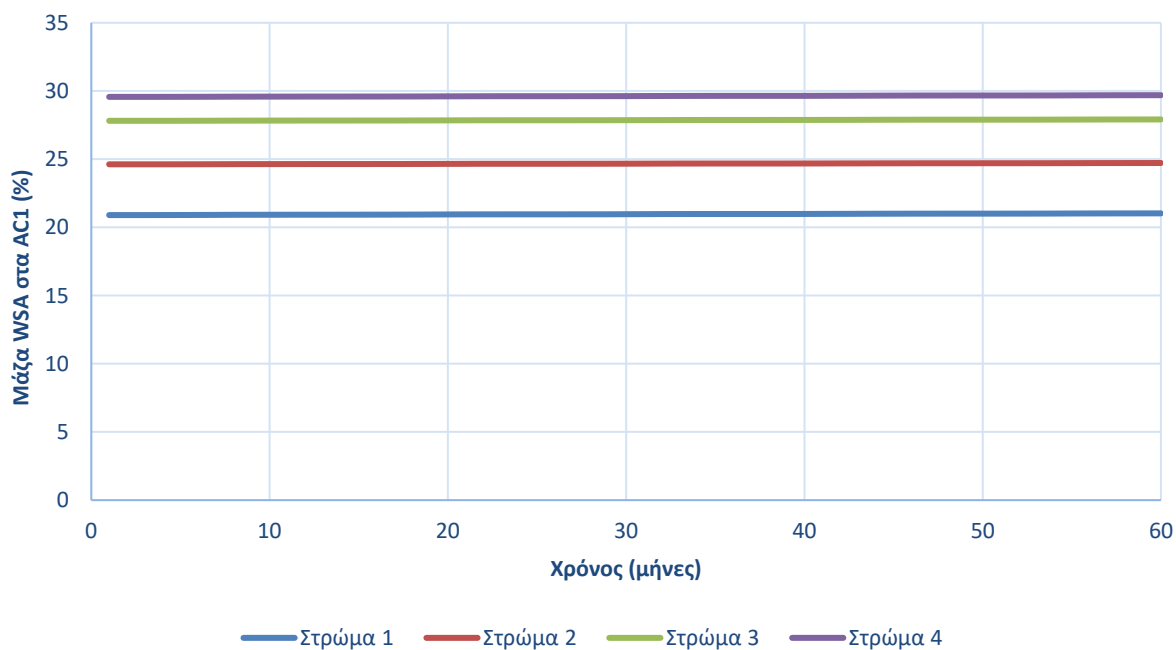
Διάγραμμα 3.7. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου  $<53\mu m$  (AC1) κάθε εδαφικής στρώσης



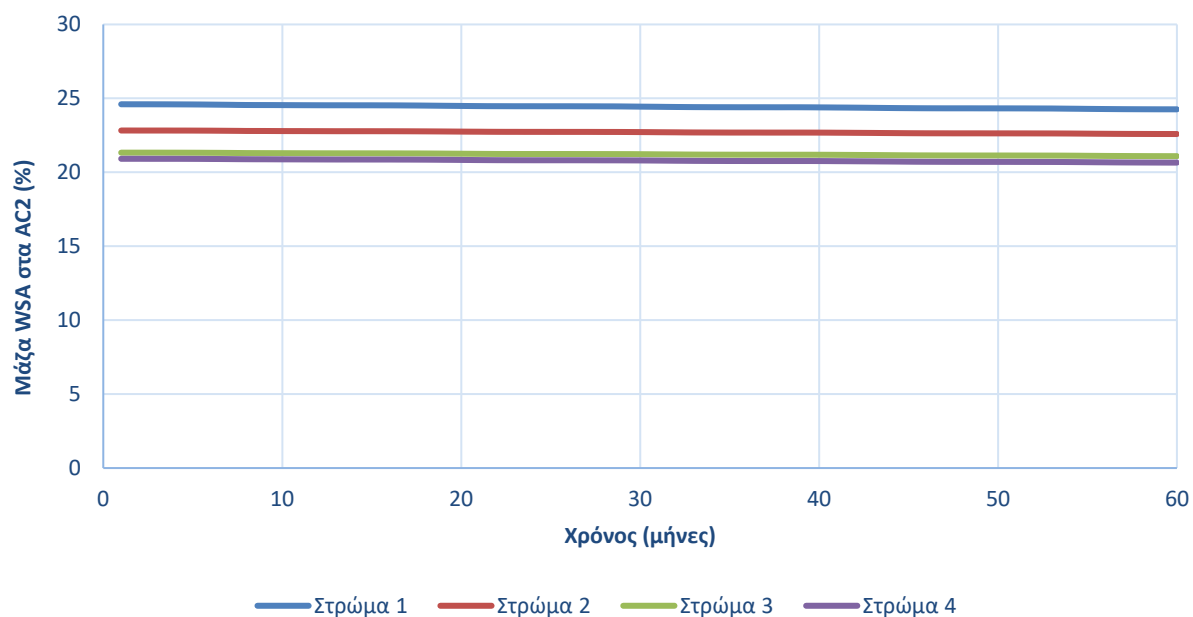
Διάγραμμα 3.8. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους 53-250 $\mu m$  (AC2) κάθε εδαφικής στρώσης



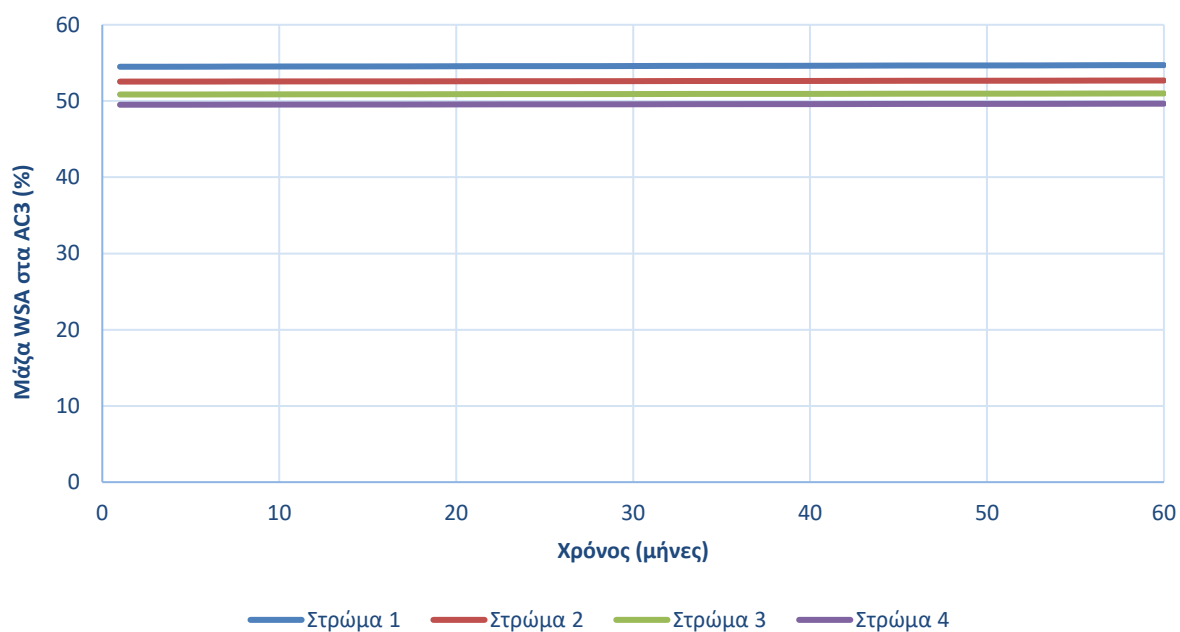
Διάγραμμα 3.9. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους  $>250\mu m$  (AC3) κάθε εδαφικής στρώσης



Διάγραμμα 3.10. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου  $<53\mu m$  (AC1) σε κάθε εδαφική στρώση



Διάγραμμα 3.11. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους 53-250 $\mu$ m (AC2) σε κάθε εδαφική στρώση



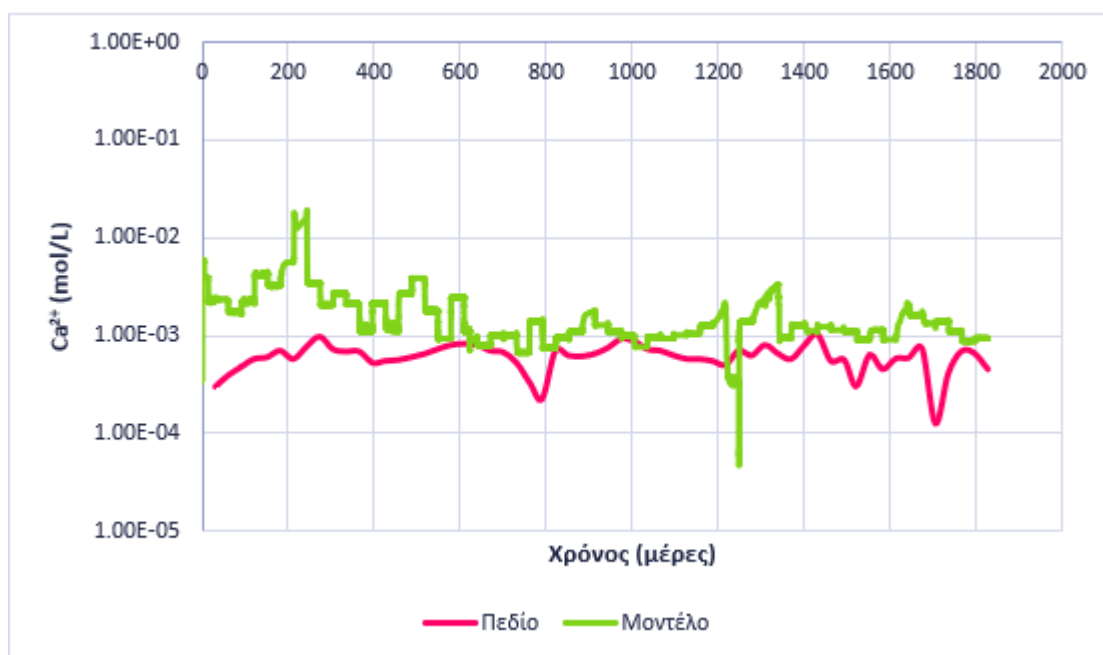
Διάγραμμα 3.12. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους >250 $\mu$ m (AC3) σε κάθε εδαφική στρώση

### 3.1.3. Διαλυτές ουσίες εδαφικού διαλύματος

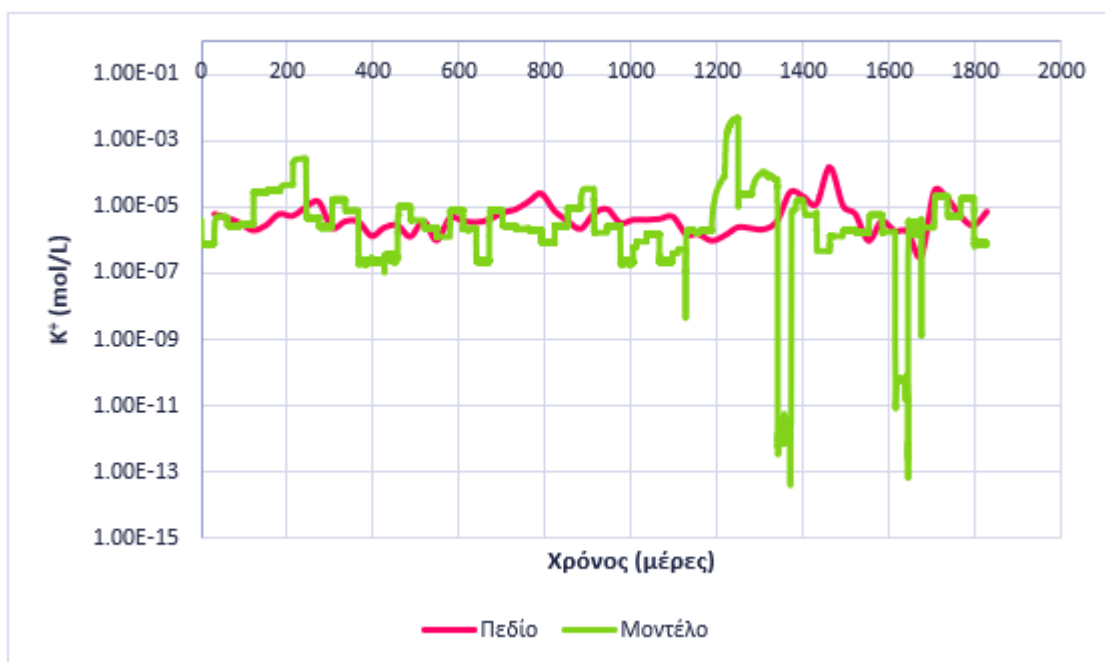
Το μοντέλο 1D-ICZ εκτός από την προσομοίωση της φυτικής ανάπτυξης, του οργανικού άνθρακα σε όλη τη μάζα του εδάφους, στα κλάσματα των συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3) και τα WSA, προβλέπει τις συγκεντρώσεις των διαλυτών ουσιών στο διάλυμα εντός του εδάφους. Στα διαγράμματα 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 και 3.17 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις των  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  και  $\text{SO}_4^{2-}$  των μετρήσεων πεδίου και των προσομοιωμένων τιμών μοντέλου ( $\text{mol L}^{-1}$ ) για το 1<sup>ο</sup> εδαφικό στρώμα (0–10 cm).

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, το μοντέλο ήταν σε θέση να προσομοιώσει με πλήρη επιτυχία τις συγκεντρώσεις των  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  και  $\text{SO}_4^{2-}$ . Εντούτοις, για το  $\text{Mg}^{2+}$  δεν υπάρχει καλή εφαρμογή των μετρήσεων πεδίου με τα αποτελέσματα του μοντέλου (Διαγρ.3.15) ενώ για το  $\text{Ca}^{2+}$  η εφαρμογή είναι μέτρια. Αυτό συμβαίνει διότι τα  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  και  $\text{SO}_4^{2-}$  προέρχονται κυρίως από τη βροχόπτωση ενώ τα  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$  εμπλουτίζονται μέσω της διάλυσης ορυκτών και συγκεκριμένα μέσω του δολομίτη. Επομένως, η αποτυχία προσομοίωσης του  $\text{Mg}^{2+}$  οφείλεται στην αλλαγή μεταβλητών του ορυκτού δολομίτη (dolomite) μέσω του μοντέλου SAFE Weathering κατά την προσπάθεια βαθμονόμησης της συγκέντρωσης  $\text{Ca}^{2+}$ . Συνεπώς, οι αλλαγές αυτές έκαναν την συγκέντρωση  $\text{Mg}^{2+}$  να αποκλίνει από τα αποτελέσματα του πεδίου.

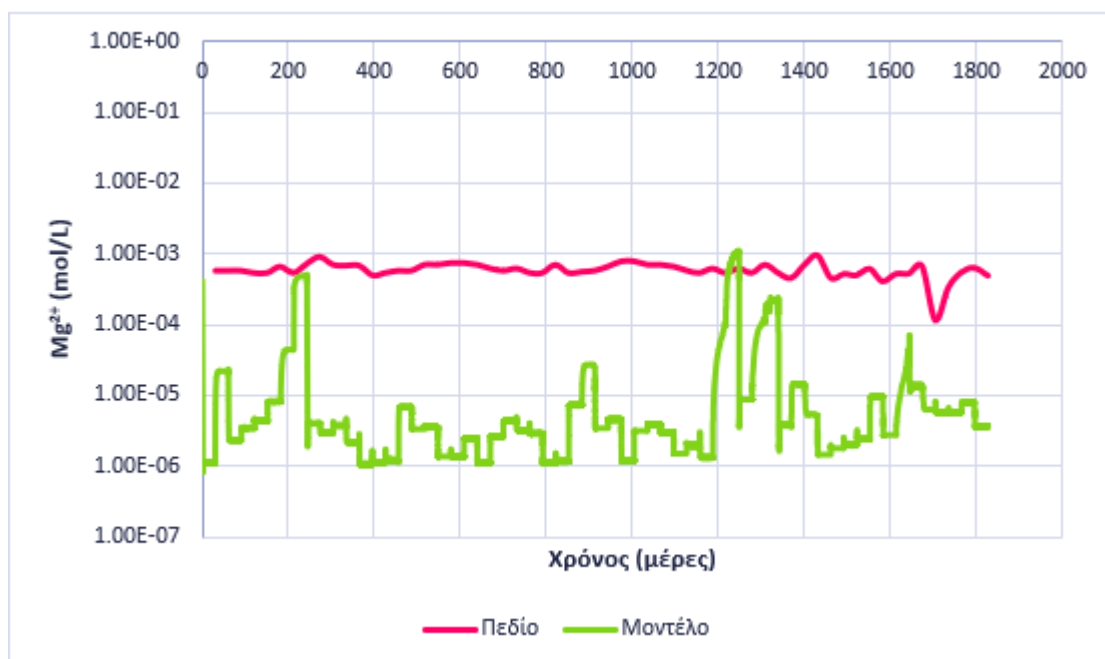
Λόγω του περιορισμένου χρόνου, αποφασίστηκε να μην δοθεί έμφαση στην τροποποίηση του κώδικα του μοντέλου SAFE Weathering με απώτερο στόχο την ταυτόχρονη προσομοίωση των συγκεντρώσεων  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Mg}^{2+}$ . Παρ' όλα αυτά είναι μια κίνηση που μελλοντικά κρίνεται απαραίτητη.



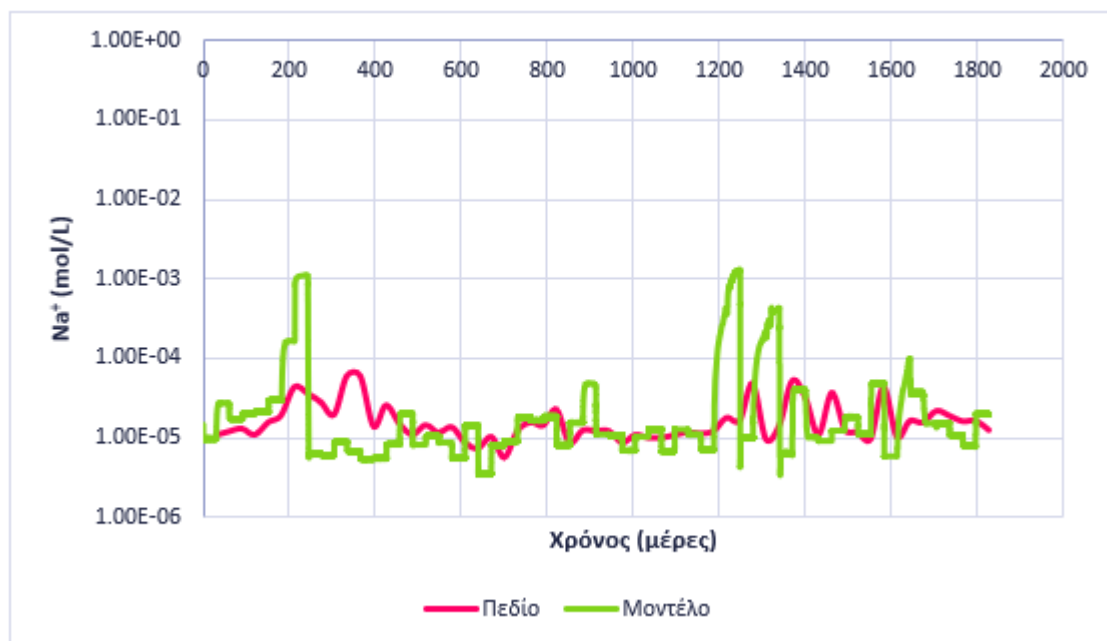
Διάγραμμα 3.13. Σύγκριση συγκεντρώσεων  $\text{Ca}^{2+}$  μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου ( $\text{mol L}^{-1}$ ) για το 1<sup>ο</sup> εδαφικό στρώμα (0–10cm)



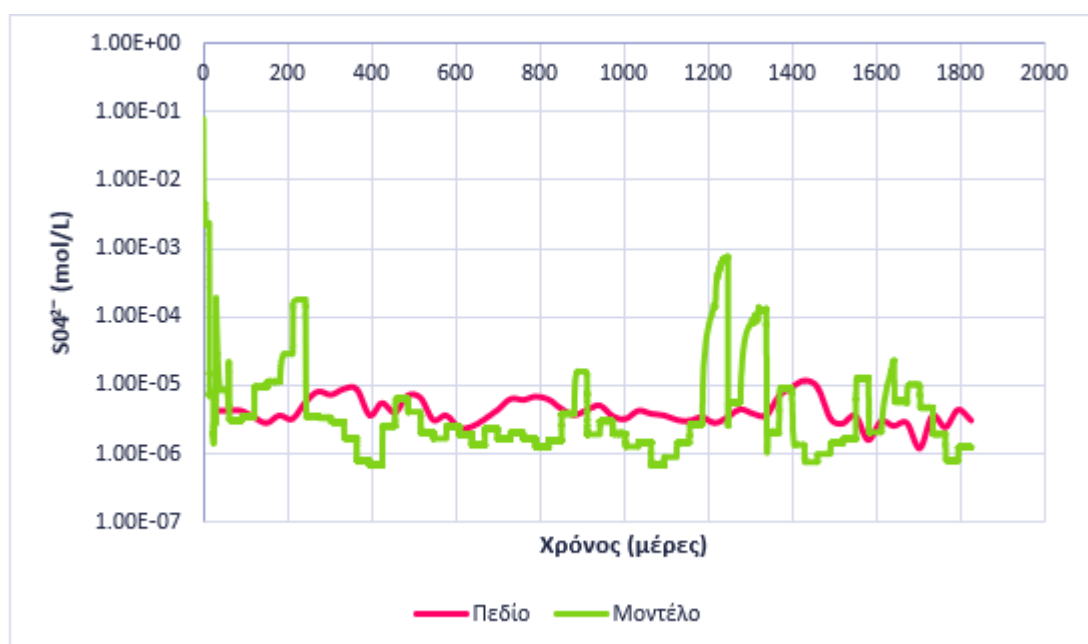
Διάγραμμα 3.14. Σύγκριση συγκεντρώσεων  $K^+$  μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου ( $mol\ L^{-1}$ ) για το 1<sup>ο</sup> εδαφικό στρώμα (0–10cm)



Διάγραμμα 3.15. Σύγκριση συγκεντρώσεων  $Mg^{2+}$  μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου ( $mol\ L^{-1}$ ) για το 1<sup>ο</sup> εδαφικό στρώμα (0–10cm)



Διάγραμμα 3.16. Σύγκριση συγκεντρώσεων Na<sup>+</sup> μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου (mol L<sup>-1</sup>) για το 1<sup>ο</sup> εδαφικό στρώμα (0–10cm)

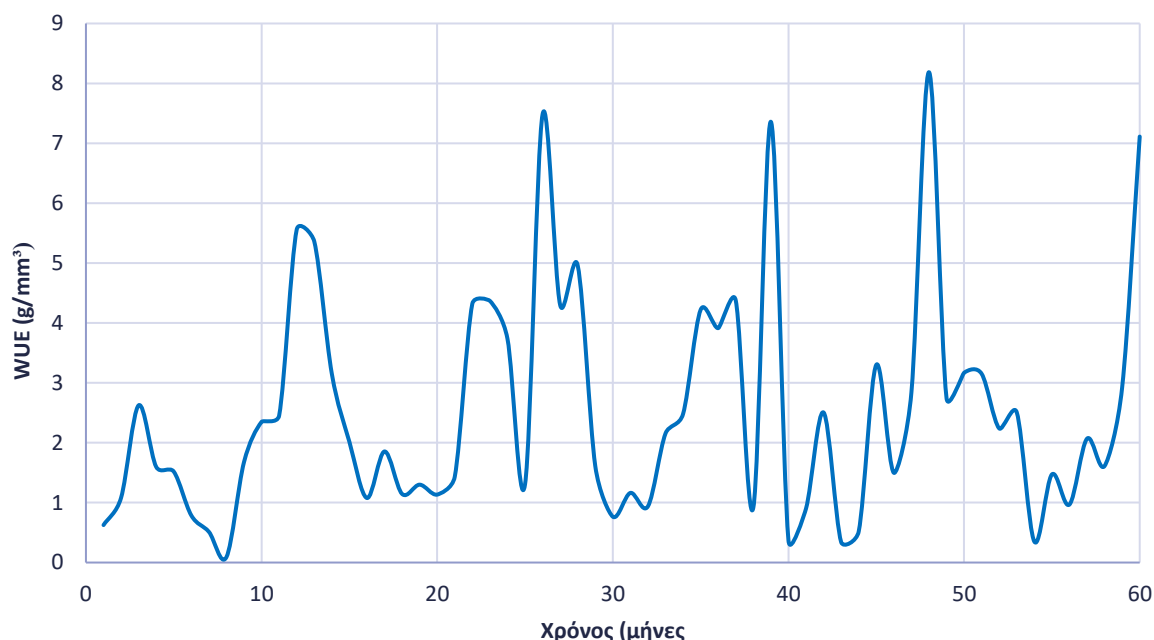


Διάγραμμα 3.17. Σύγκριση συγκεντρώσεων SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> μετρήσεων πεδίου και προσομοιωμένων τιμών μοντέλου (mol L<sup>-1</sup>) για το 1<sup>ο</sup> εδαφικό στρώμα (0–10cm)



### 3.1.4. WUE

Στο Διάγραμμα 3.18 παρουσιάζεται το WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ ) κατά τη διάρκεια της 5ετίας (2015–2019). Παρατηρείται πως υπάρχουν διακυμάνσεις, με το WUE να κυμαίνεται μεταξύ 0.09 και  $8.2 \text{ g mm}^{-3}$ . Οι τιμές αυτές αποτελούν αποδεκτές τιμές WUE.



Διάγραμμα 3.18. WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ ) για χρονικό διάστημα 60 μηνών (2015-2019)

## 3.2. Μοντέλο 1D-ICZ 600 μηνών

### 3.2.1. Φυτική Ανάπτυξη

Όπως έγινε αντιληπτό, μέσω της υποπαραγράφου 3.1.1, ο παράγοντας που επηρεάζει την ανάπτυξη του είδους δέντρου *Picea abies* του δασικού οικοσυστήματος είναι ο φώσφορος (P). Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται και μέσω του διαγράμματος 3.19 που απεικονίζει τους περιοριστικούς παράγοντες για το χρονικό διάστημα 25 ετών (1996–2020).

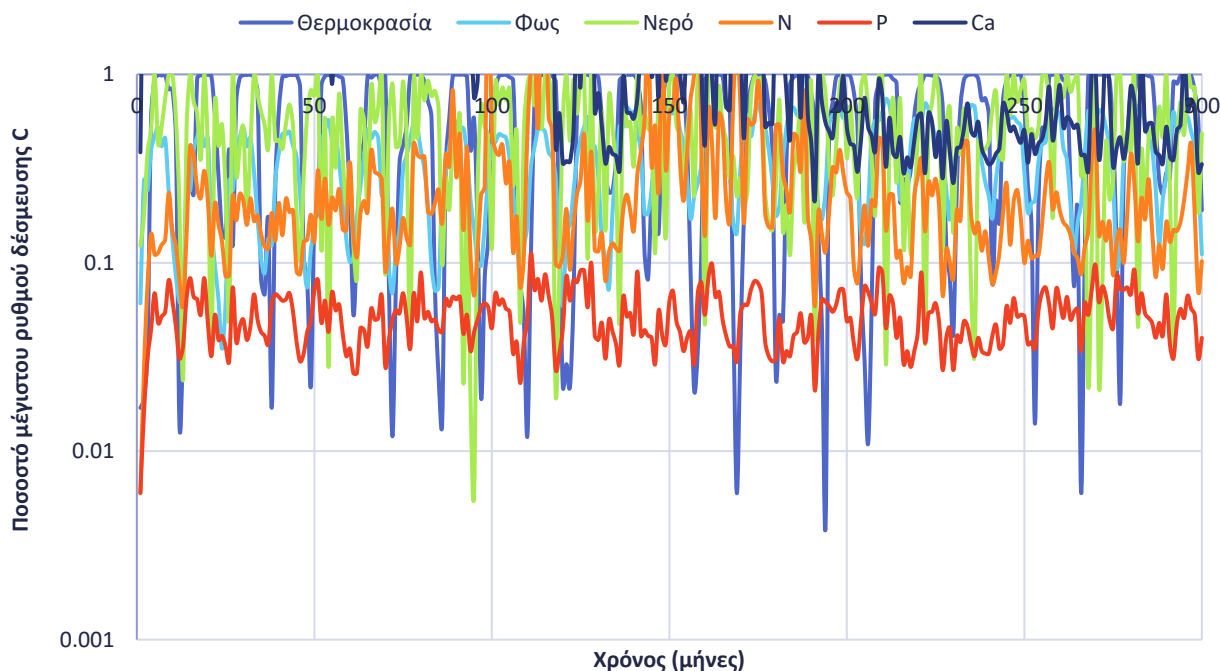
Λόγω της έλλειψης μετρήσεων φωσφορικών ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης ρυθμίστηκαν οι αρχικές συγκεντρώσεις των φωσφορικών στο εδαφικό διάλυμα και στη χημεία της βροχόπτωσης να είναι  $5 \cdot 10^{-7}$  και  $4.3 \cdot 10^{-7} \text{ mol L}^{-1}$  αντιστοίχως. Έτσι, προέκυψε το Διάγραμμα 3.20 που παρουσιάζει την παραγωγή ολικής βιομάζας C και N με τις τιμές x να είναι οι παρατηρούμενες μετρήσεις πεδίου βιομάζας C του είδους δέντρου *Picea abies*. Παρατηρείται ότι η μηνιαία παραγωγή C ολικής βιομάζας του *Picea abies* παρουσιάζει αυξομειώσεις μεταξύ 53.7 και  $82.3 \text{ mol m}^{-2}$  ενώ η μηνιαία παραγωγή N ολικής βιομάζας διατηρείται πιο σταθερή λαμβάνοντας τιμές από 0.7 έως  $1.1 \text{ mol m}^{-2}$  (Διαγρ.3.20). Σε ετήσια βάση παρατηρείται ότι η παραγωγή C ολικής βιομάζας έχει αυξητική τάση με το λιγότερο παραγωγικό έτος να είναι το 1996 ενώ το πιο παραγωγικό έτος να είναι το 2020. Τα δεδομένα πεδίου του είδους δέντρου *Picea abies* αναφέρονται στις 07/08/2012 (μήνας 200), στις 09/09/2014 (μήνας 225), στις 23/09/2019 (μήνας 285) και λαμβάνουν τιμές ολικής

βιομάζας C 73.5, 70.9 και 74.2 mol m<sup>-2</sup>. Τα αποτελέσματα του μοντέλου έχουν καλή προσαρμογή στις μετρήσεις πεδίου, επομένως η βαθμονόμηση ήταν επιτυχής.

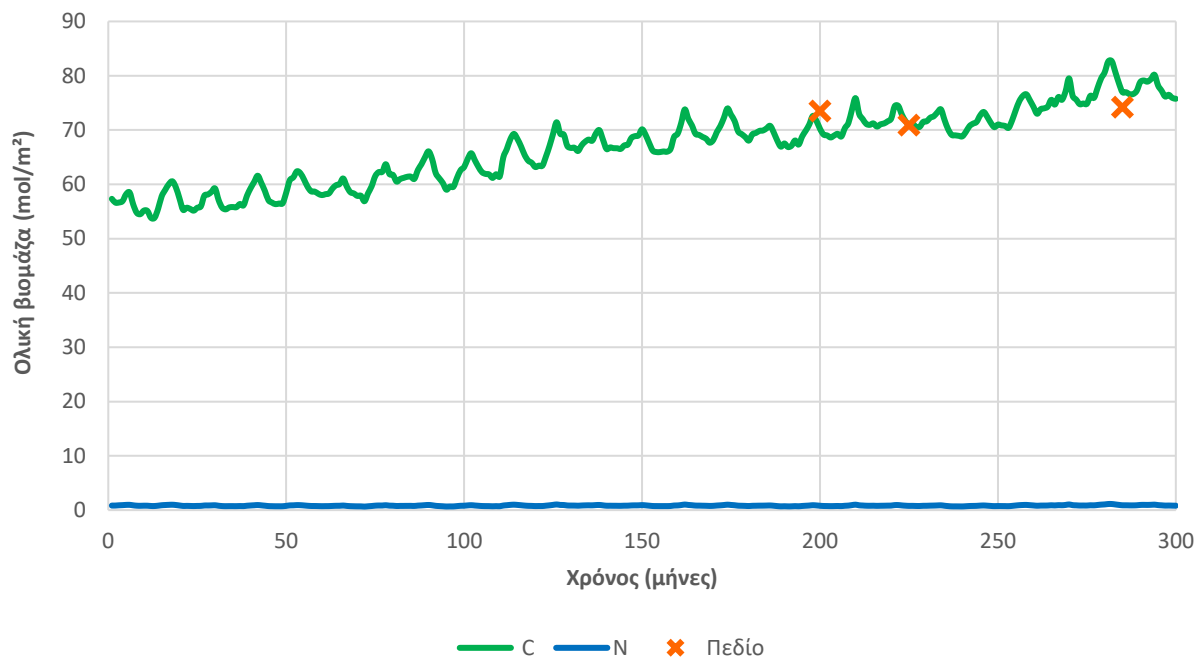
Σύμφωνα με την προσομοίωση της πρόσληψης των θρεπτικών συστατικών C, N, P, K, Ca, Mg (Διαγρ.3.21) παρατηρείται ότι η τάση χρησιμοποίησης του N ακολουθεί την τάση χρησιμοποίησης του C. Ειδικότερα, η πρόσληψη C κυμαίνεται μεταξύ 0.19 και 5.8 mol m<sup>-2</sup> ενώ η πρόσληψη N κυμαίνεται μεταξύ 0.005 και 0.17 mol m<sup>-2</sup>. Επιπροσθέτως, η προσρόφηση των Ca, Mg, P και K κυμαίνεται από 0.001 έως 0.014, 0.001 έως 0.003, 0.001 έως 0.006 και 0.001 έως 0.025 mol m<sup>-2</sup> αντίστοιχα.

Τα αποθέματα C στο ξυλώδη ιστό, στα φύλλα, στις ρίζες και στις μυκόρριζες του είδους δέντρου *Picea abies* απεικονίζονται στο Διάγραμμα 3.22. ενώ τα αποθέματα N στο ξυλώδη ιστό, στα φύλλα και στις ρίζες του παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 3.23. Όσον αφορά τα αποθέματα C του ξυλώδους ιστού, αυτά έχουν αυξητική τάση μεταξύ 38.4 και 61.4 mol m<sup>-2</sup> και τα αποθέματα N κυμαίνονται από 0.13 έως 0.21 mol m<sup>-2</sup>. Ακόμη, τα αποθέματα C και N στα φύλλα παρουσιάζουν διακυμάνσεις μεταξύ 2.8 και 7.4, και 0.09 έως 0.22 mol m<sup>-2</sup> αντίστοιχα. Τα αποθέματα C και N στις ρίζες παρουσιάζουν αυξομειώσεις από 5.2 έως 9.3 και από 0.06 έως 0.11 mol m<sup>-2</sup> αντίστοιχα. Τέλος, τα αποθέματα C στις μυκόρριζες διατηρούνται σχετικά σταθερά στα 4 mol m<sup>-2</sup>.

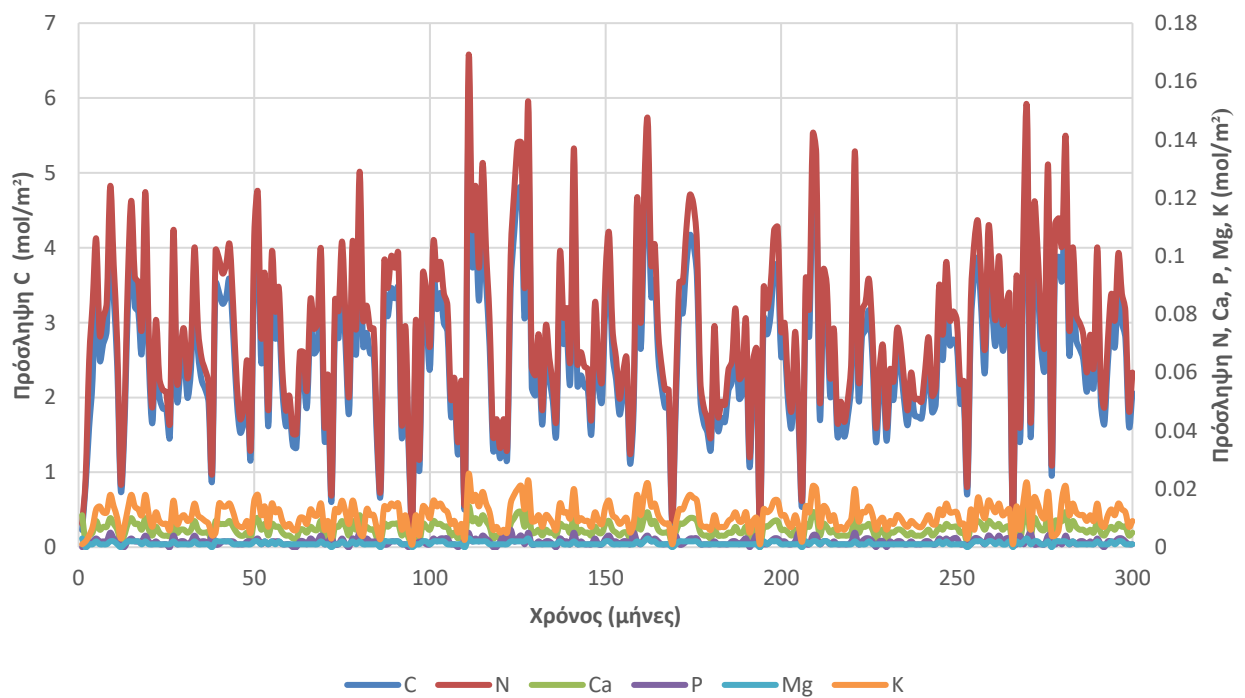
Συμπερασματικά, το μοντέλο 1D-ICZ προσομοίωσε με επιτυχία τους περιοριστικούς παράγοντες, την παραγόμενη βιομάζα C και N, την πρόσληψη θρεπτικών ουσιών και τα διαθέσιμα αποθέματα C και N στα μέρη των δέντρων *Picea abies* του δασικού οικοσυστήματος.



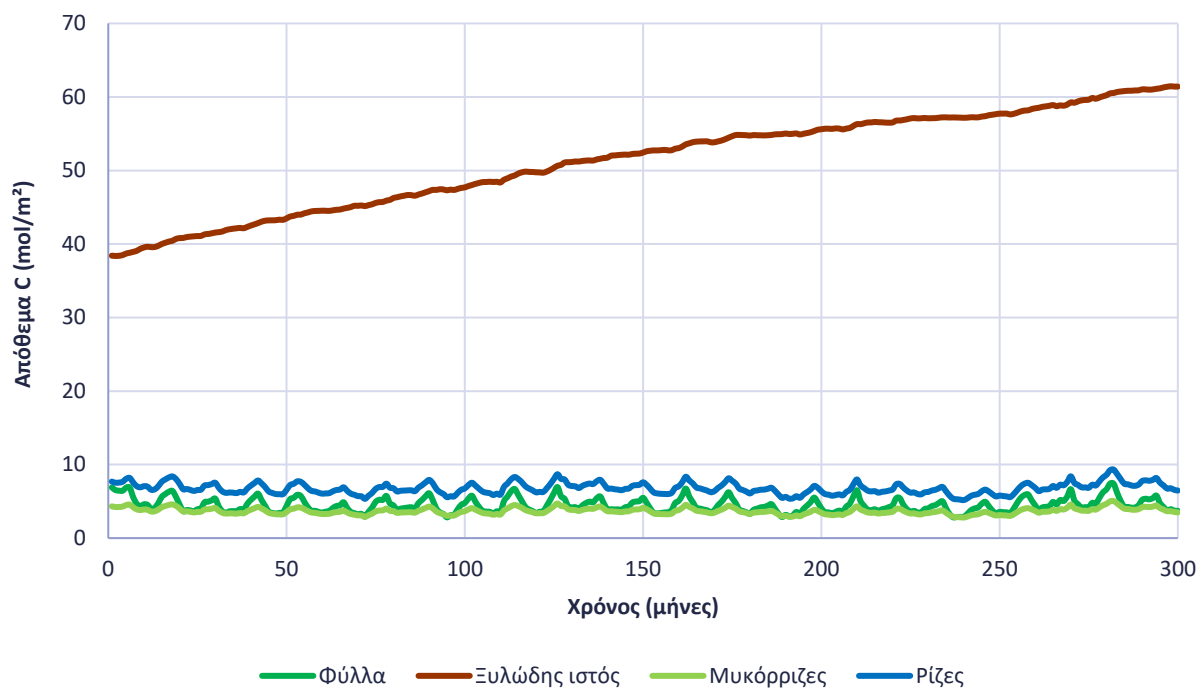
Διάγραμμα 3.19. Περιοριστικοί παράγοντες φυτικής παραγωγής (*Picea abies*)



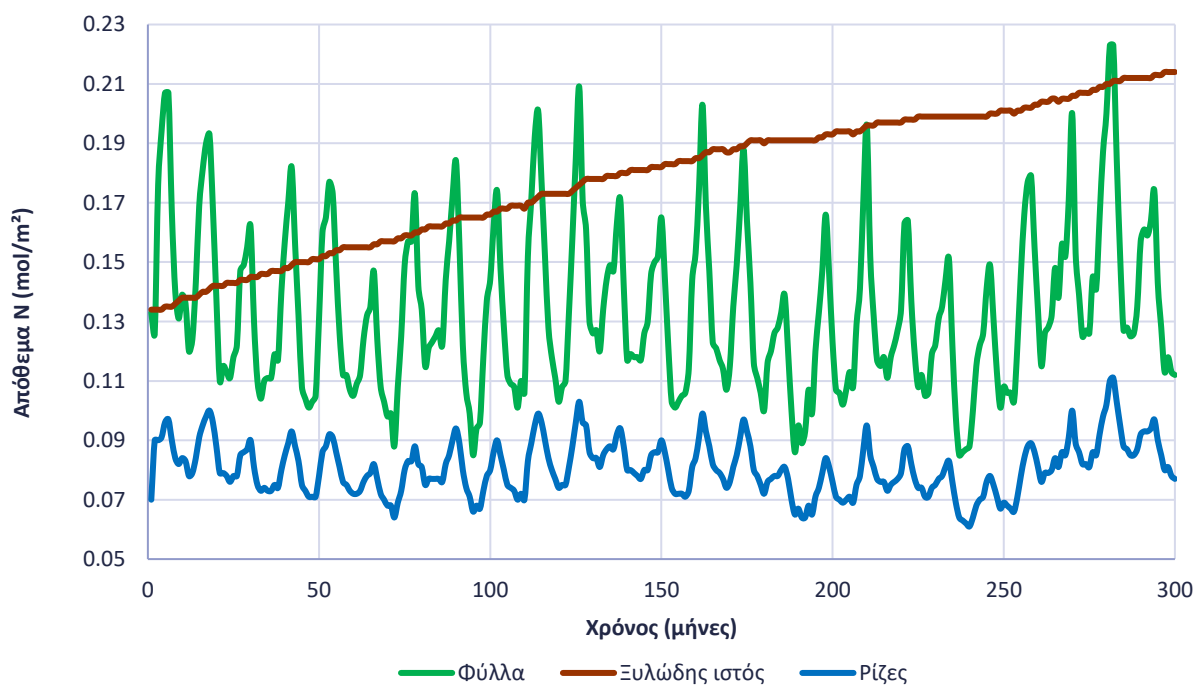
Διάγραμμα 3.20. Κατανομή ολικής βιομάζας C και N του είδους δέντρου *Picea abies* ( $\text{mol m}^{-2}$ )



Διάγραμμα 3.21. Πρόσληψη θρεπτικών συστατικών C, N, Ca, P, Mg και K ( $\text{mol m}^{-2}$ )



Διάγραμμα 3.22. Απόθεμα C ( $\text{mol m}^{-2}$ ) στα φύλλα, στο ξυλώδη ιστό, στις ρίζες και τις μυκόρριζες του είδους δέντρου *Picea abies*



Διάγραμμα 3.23. Απόθεμα N ( $\text{mol m}^{-2}$ ) στα φύλλα, στο ξυλώδη ιστό και στις ρίζες του είδους δέντρου *Picea abies*

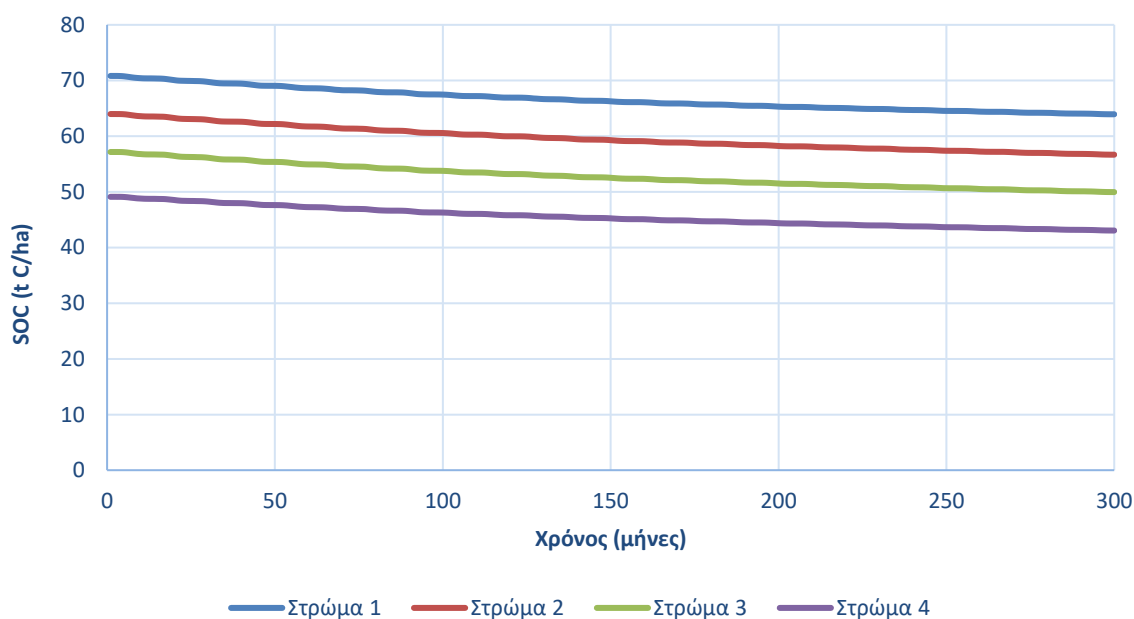
### 3.2.2. Οργανικός άνθρακας (OC) εδάφους, κλασμάτων συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3) και υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA)

Κατά την 25ετία παρατηρείται ότι ο οργανικός άνθρακας (OC) σε όλη τη μάζα του εδάφους (4 στρώματα) μειώνεται με σταθερό ρυθμό (Διαγρ.3.24). Αυτό προκύπτει λόγω του ότι δεν εφαρμόζονται τεχνικές αύξησης της οργανικής ύλης όπως εφαρμογή λιπασμάτων, εδαφοβελτιωτικών (κόμποστ), κοπριάς κλπ. Επομένως, ο οργανικός άνθρακας που δεσμεύεται είναι συγκεκριμένος και αποτελεί απόρροια της ενσωμάτωσης των φυτικών υπολειμμάτων στο έδαφος.

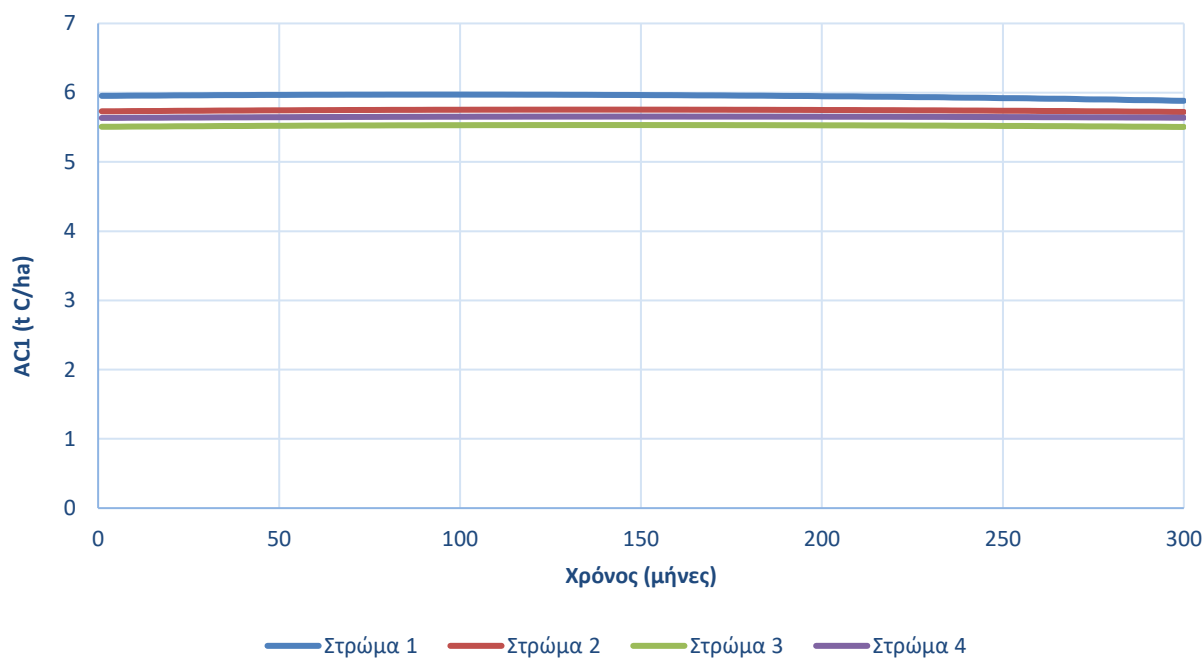
Εκτός του οργανικού άνθρακα όλων των στρωμάτων του εδάφους, προσομοιώνεται ο οργανικός άνθρακας που περιέχεται σε κάθε κλάσμα συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3) και παρουσιάζεται στα διαγράμματα 3.25, 3.26 και 3.27 αντίστοιχα. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι οργανικός άνθρακας όλων των εδαφικών στρωμάτων στα κλάσματα AC1 και AC3 διατηρείται σταθερός ενώ στο κλάσμα AC2 έχει πτωτική τάση.

Επίσης, μέσω του μοντέλου 1D-ICZ πραγματοποιείται η εύρεση της μάζας των υδατοσταθερών συσσωματωμάτων (WSA) σε κάθε ένα από τα κλάσματα συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3). Η μάζα των WSA στα AC1, AC2 και AC3 απεικονίζεται στα διαγράμματα 3.28, 3.29 και 3.30. Παρατηρείται ότι η μάζα των WSA στο κλάσμα AC1 παραμένει σταθερή, η μάζα των WSA στο κλάσμα AC2 μειώνεται ελαφρώς και τέλος, η μάζα των WSA στο κλάσμα AC3 παρουσιάζει μικρή αύξηση.

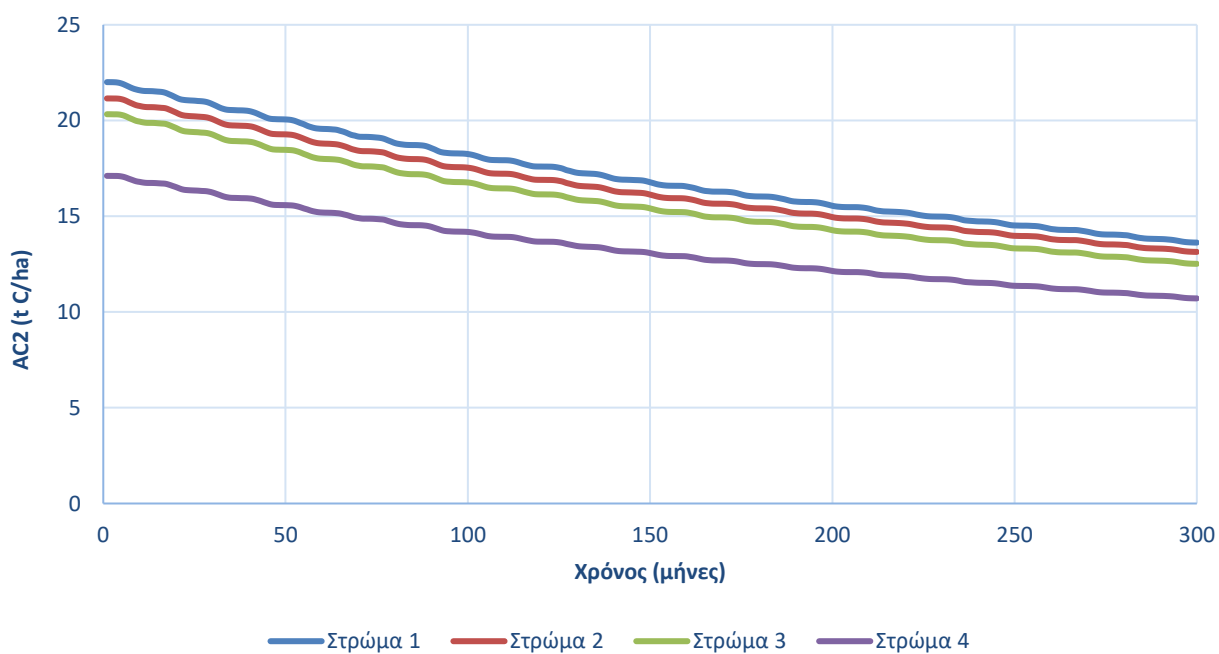
Αξίζει να επισημανθεί ότι λόγω της απουσίας κλασματοποίησης της μάζας του εδάφους δεν υπάρχουν δεδομένα πεδίου για να επιτευχθεί κάποια σύγκριση με τα αποτελέσματα που δίνει το μοντέλο. Ωστόσο, μελλοντικά θα ήταν χρήσιμη η δειγματοληψία μέρους της μάζας του εδάφους του Zöbelboden έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν διαδικασίες όπως η κλασματοποίηση (WSA Fractionation), η διόρθωση άμμου (Sand Correction Procedure) κλπ. με απώτερο στόχο την καλύτερη προσομοίωση της εδαφικής δομής.



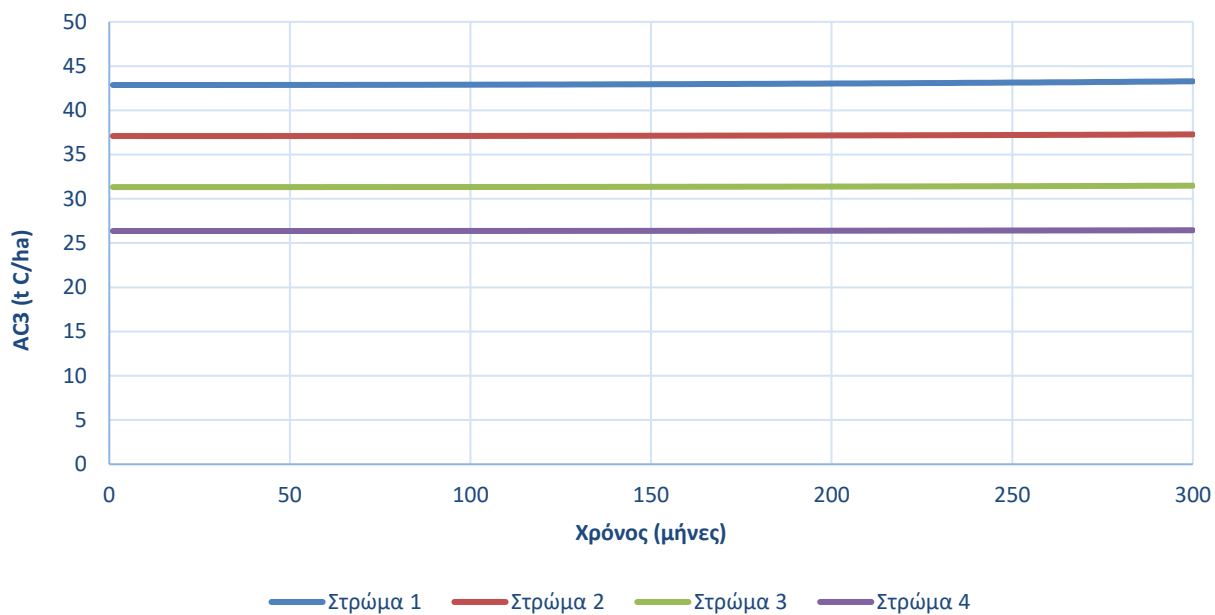
Διάγραμμα 3.24. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) στα τέσσερα εδαφικά στρώματα



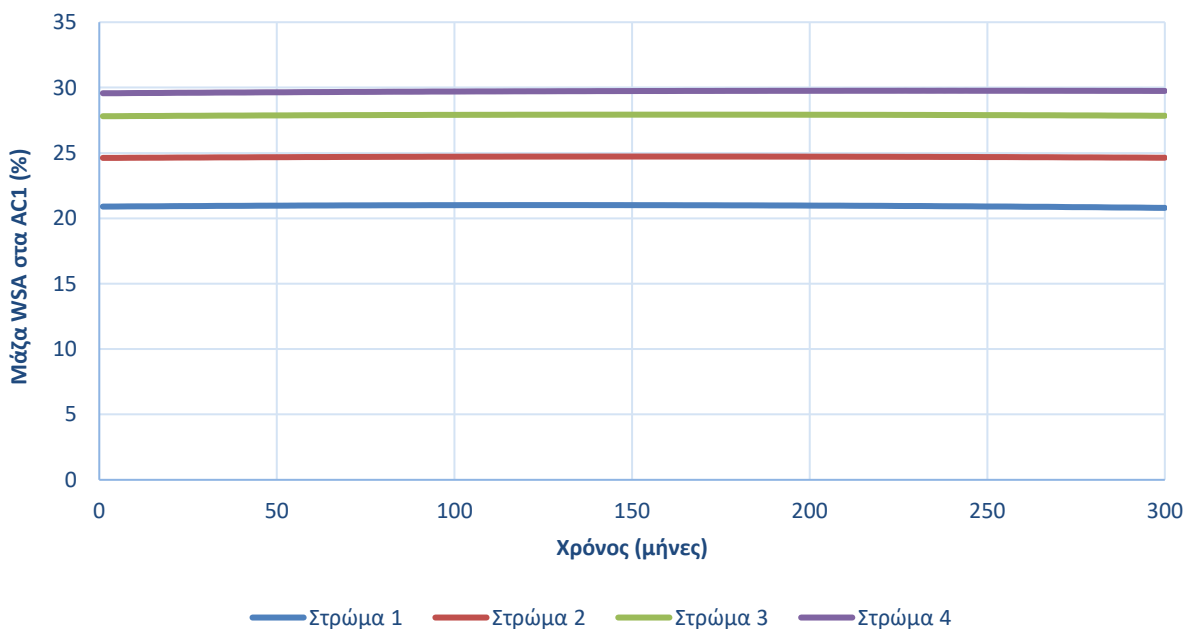
Διάγραμμα 3.25. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου  $<53\mu m$  (AC1) κάθε εδαφικής στρώσης



Διάγραμμα 3.26. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους  $53-250\mu m$  (AC2) κάθε εδαφικής στρώσης

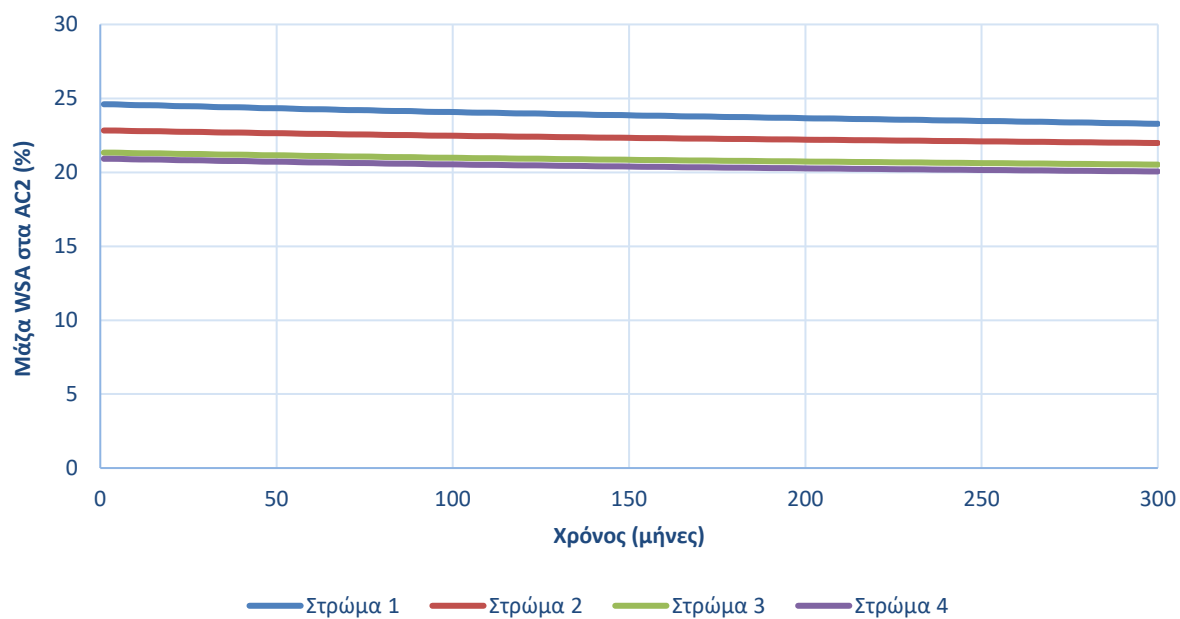


Διάγραμμα 3.27. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) που περιέχεται στα συσσωματώματα μεγέθους  $>250\mu m$  (AC3) κάθε εδαφικής στρώσης

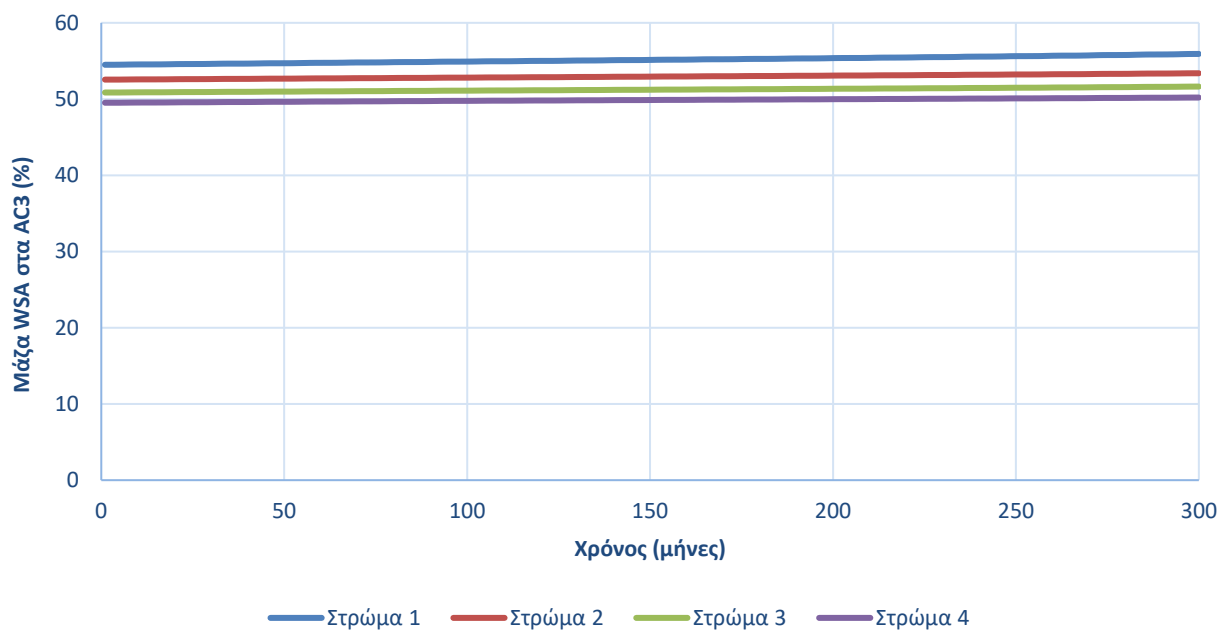


Διάγραμμα 3.28. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου  $<53\mu m$  (AC1) σε κάθε εδαφική στρώση





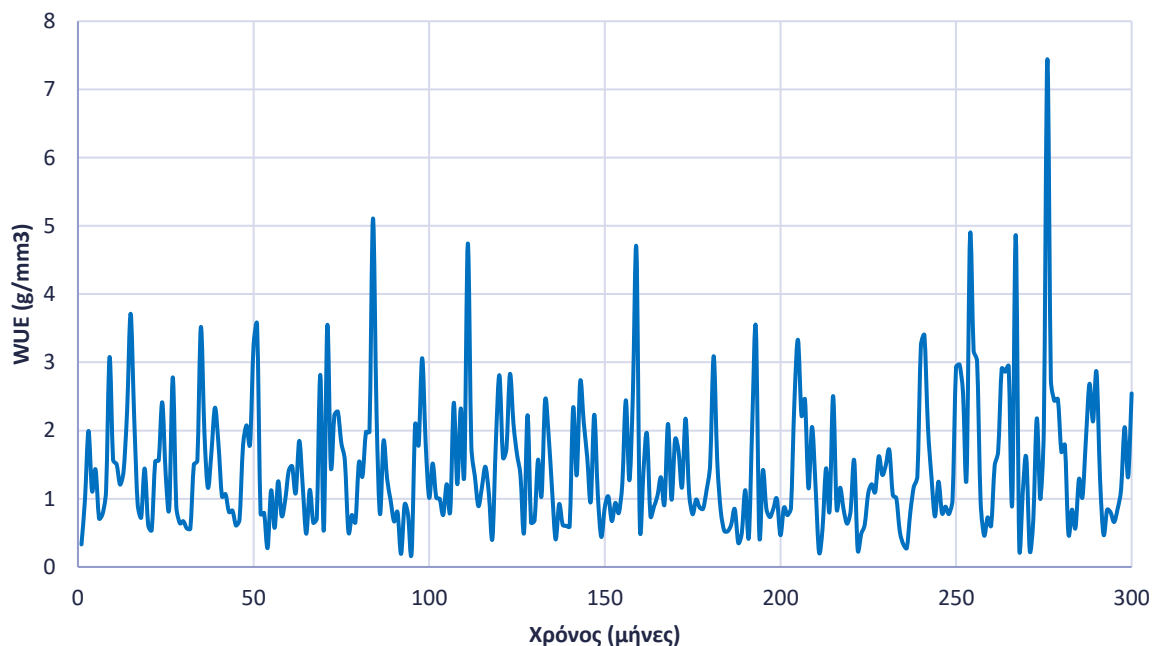
Διάγραμμα 3.29. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους 53-250 $\mu$ m (AC2) σε κάθε εδαφική στρώση



Διάγραμμα 3.30. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους >250 $\mu$ m (AC3) σε κάθε εδαφική στρώση

### 3.2.3. WUE

Στο Διάγραμμα 3.31 παρουσιάζεται το WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ ) κατά τη διάρκεια της 25ετίας (1996–2020). Παρατηρείται πως υπάρχουν μηνιαίες διακυμάνσεις, με το WUE να κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και  $7.4 \text{ g mm}^{-3}$ . Οι τιμές αυτές αποτελούν αποδεκτές τιμές WUE.

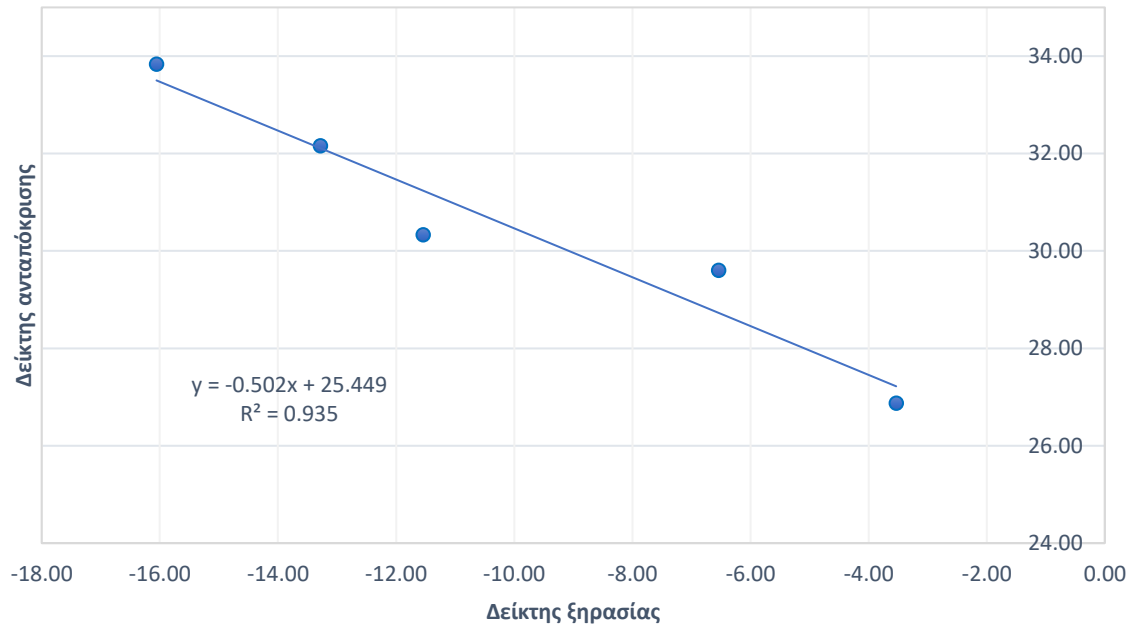


Διάγραμμα 3.31. WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ ) για χρονικό διάστημα 300 μηνών (1996-2020)

### 3.3. Παράγοντες που επηρεάζουν την GPP

#### 3.3.1. GPP και ξηρασία

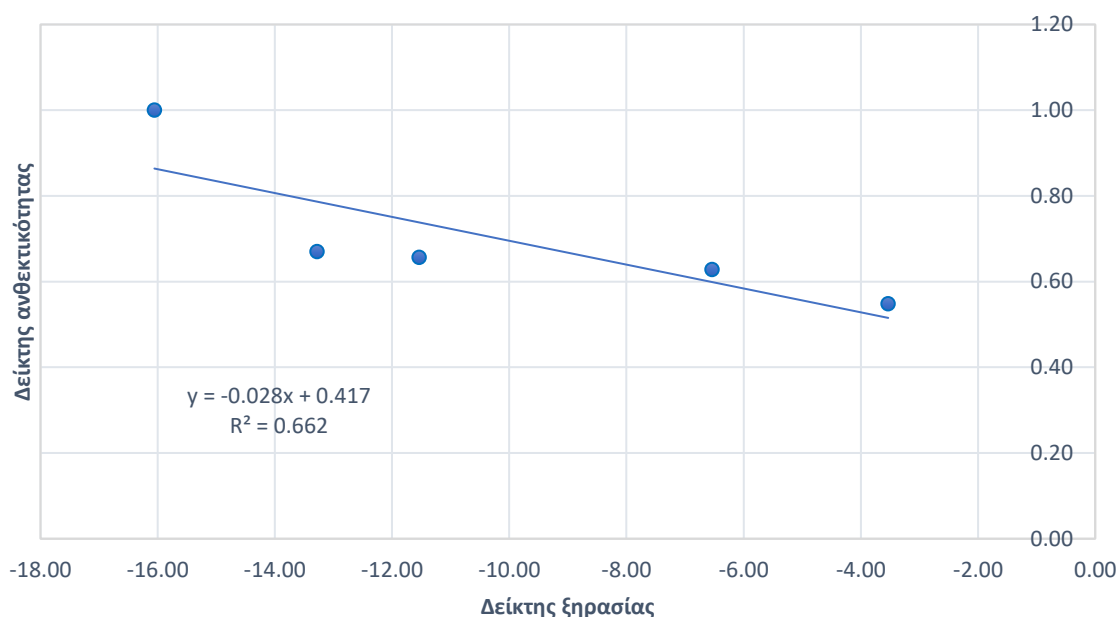
Κατόπιν υπολογισμού του WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ ) της 25ετίας (1996–2020) μελετήθηκε η επίδραση του φαινομένου της ξηρασίας (drought) στην GPP. Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η σχέση μεταξύ του δείκτη ξηρασίας (Drought Index) και του δείκτη ανταπόκρισης (Response Index) (Διαγρ.3.32). Μέσω της μελέτης αυτής, προκύπτει πως ο δείκτης ξηρασίας συνδέεται άρρηκτα με το δείκτη ανταπόκρισης. Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι η  $RI = 25.449 - 0.502 \cdot DI$  με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.935$ . Αυτό σημαίνει ότι το 94% της μεταβολής του δείκτη ανταπόκρισης οφείλεται στο δείκτη ξηρασίας. Με απλά λόγια, όσο αυξάνεται η ένταση της ξηρασίας τόσο αυξάνεται και η ανταπόκριση.



Διάγραμμα 3.32. Δείκτης ξηρασίας συναρτήσει δείκτη ανταπόκρισης

### 3.3.2. Ανθεκτικότητα GPP και ξηρασία

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η επίδραση της ξηρασίας στην ανθεκτικότητα της GPP. Για την ακρίβεια, εξετάστηκε η συσχέτιση του δείκτη ξηρασίας (Drought Index) με το δείκτη ανθεκτικότητας (Resilience Index) (Διαγρ.3.33). Μέσω της μελέτης αυτής, προκύπτει πως υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του δείκτη ξηρασίας και του δείκτη ανθεκτικότητας. Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι η  $\text{Resilience Index} = 0.417 - 0.028 \cdot \text{DI}$  με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0.662$ . Αυτό υποδηλώνει ότι το 66% της μεταβολής του δείκτη ανθεκτικότητας οφείλεται στο δείκτη ξηρασίας. Δηλαδή, όταν αυξάνεται η ένταση της ξηρασίας αυξάνεται και η ανθεκτικότητα της GPP.



Διάγραμμα 3.33. Δείκτης ξηρασίας συναρτήσει δείκτη ανθεκτικότητας GPP

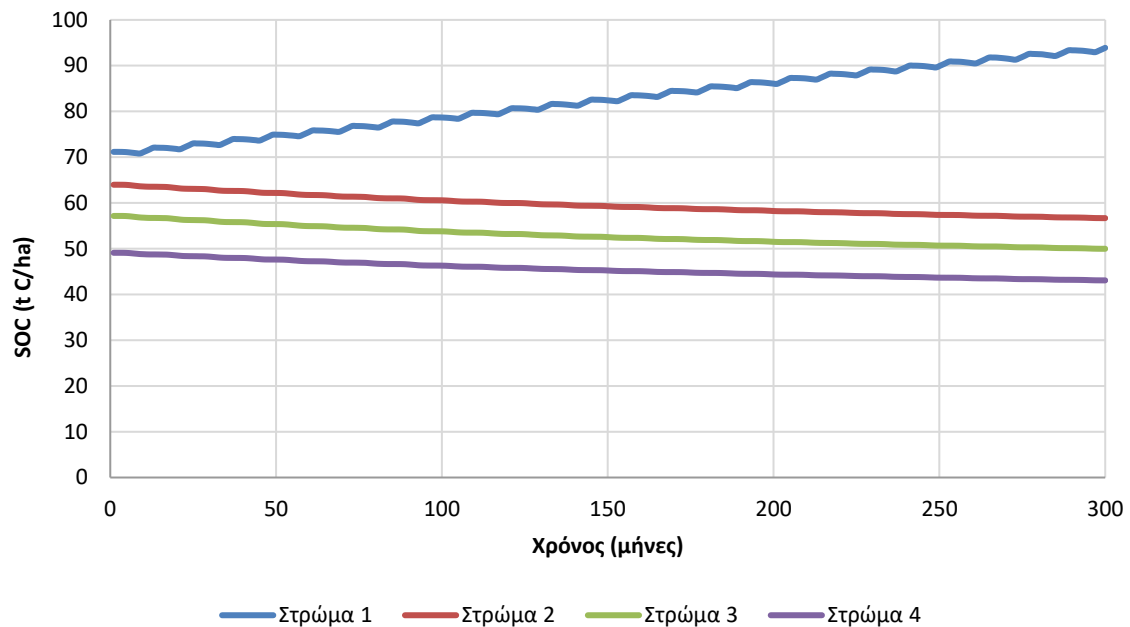
### 3.3.3. GPP και αλλαγή δομής εδάφους

#### i) Οργανικός άνθρακας (OC) εδάφους, κλασμάτων συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3) και υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA)

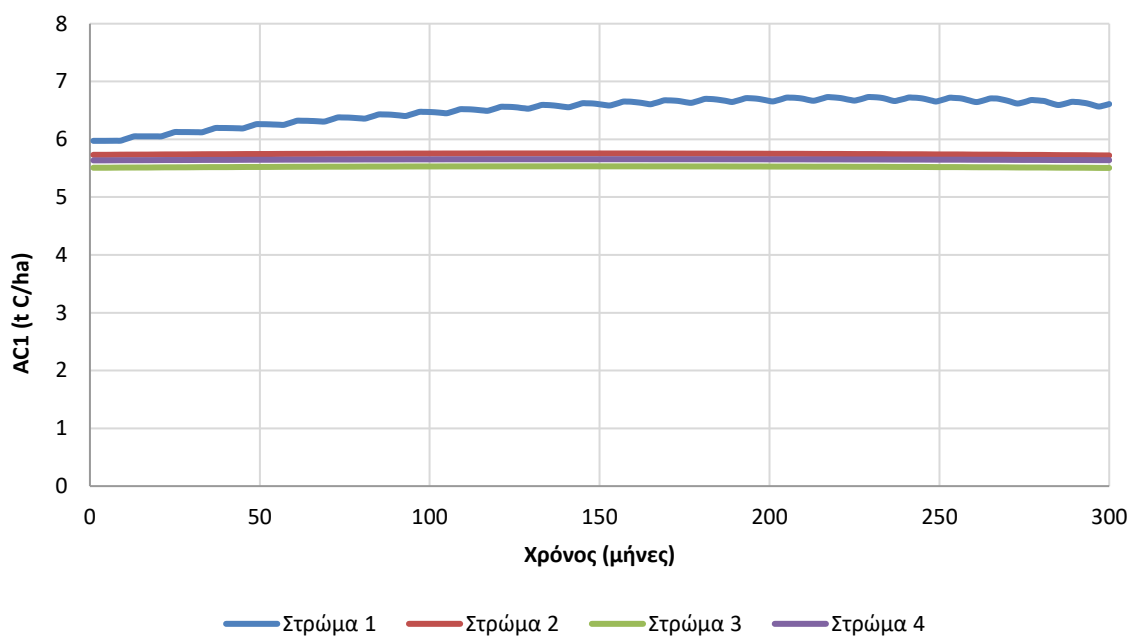
Κατόπιν, μελετήθηκε η επίδραση της αλλαγής της εδαφικής δομής στην GPP. Αυτό επιτεύχθηκε με την εκτέλεση ενός σεναρίου προσθήκης οργανικής ύλης υπό μορφή εδαφοβελτιωτικού (κόμποστ). Η προσθήκη κόμποστ αύξησε τη δέσμευση του οργανικού άνθρακα του 1<sup>ου</sup> εδαφικού στρώματος από τους 70 tC ha<sup>-1</sup> στους 94 tC ha<sup>-1</sup> (Διαγρ.3.34). Αντιθέτως, ο οργανικός άνθρακας των υπόλοιπων τριών στρωμάτων παρέμεινε ίδιος παρουσιάζοντας πτωτική τάση. Επίσης, η προσθήκη οργανικής ύλης επηρέασε τον οργανικό άνθρακα του 1<sup>ου</sup> στρώματος στα κλάσματα συσσωματωμάτων (AC1, AC2, AC3). Πιο συγκεκριμένα, ο οργανικός άνθρακας στο κλάσμα AC1 (Διαγρ.3.35) παρουσίασε μια μικρή αύξηση από τους 6.0 tC ha<sup>-1</sup> στους 6.6 tC ha<sup>-1</sup> (+0.6 tC ha<sup>-1</sup>). Στο κλάσμα AC2 ο οργανικός άνθρακας μειώθηκε από τους 22 tC ha<sup>-1</sup> στους 9 tC ha<sup>-1</sup> (-13 tC ha<sup>-1</sup>) (Διαγρ.3.36) και τέλος, στο κλάσμα AC3 ο οργανικός άνθρακας αυξήθηκε από τους 43 tC ha<sup>-1</sup> στους 53 tC ha<sup>-1</sup> (+10 tC ha<sup>-1</sup>) (Διαγρ.3.37).

Όσον αφορά την μάζα των WSA στα κλάσματα AC1, AC2, AC3 αυτή παρουσιάζεται στα διαγράμματα 3.38, 3.39 και 3.40 αντίστοιχα. Η μάζα των WSA στους 3 τύπους συσσωματωμάτων παραμένει ίδια για τα εδαφικά στρώματα 2, 3 και 4 ενώ για το στρώμα 1 υπάρχουν διαφοροποιήσεις. Για την ακρίβεια, η μάζα των WSA της 1<sup>ης</sup> εδαφικής στρώσης στα κλάσματα AC1 (κλάσμα μεγέθους ιλύος-αργίλου) και AC2 (μικρο-συσσωματώματα) μειώνεται από 21% σε 16% και από 25% σε 19%. Ωστόσο, η μάζα των WSA στο κλάσμα AC3 (μακρο-συσσωματώματα) παρουσιάζει αύξηση από 55% σε 65%.

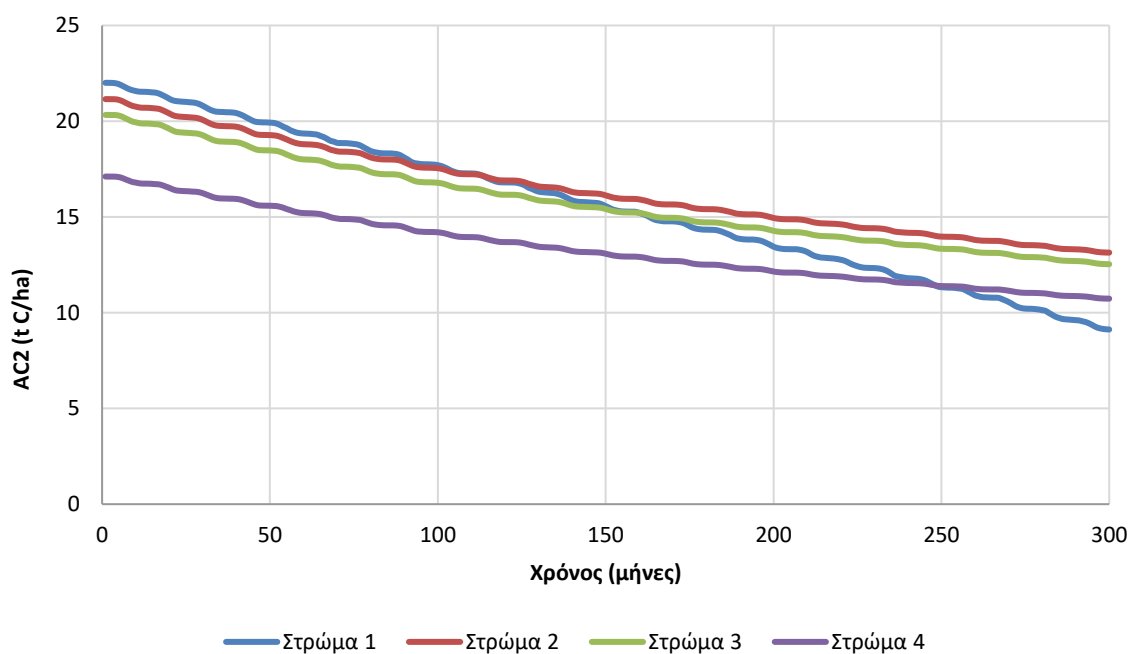
Συνοψίζοντας, η προσθήκη οργανικής ύλης αυξάνει τη δέσμευση του οργανικού άνθρακα σε όλη τη μάζα του εδάφους και τα υδατοσταθερά μακρο-συσσωματώματα (AC3). Η ύπαρξη υδατοσταθερών μακρο-συσσωματωμάτων συνεπάγεται καλή ποιότητα εδαφικής δομής η οποία με την σειρά της επιδρά στη γονιμότητα των εδαφών.



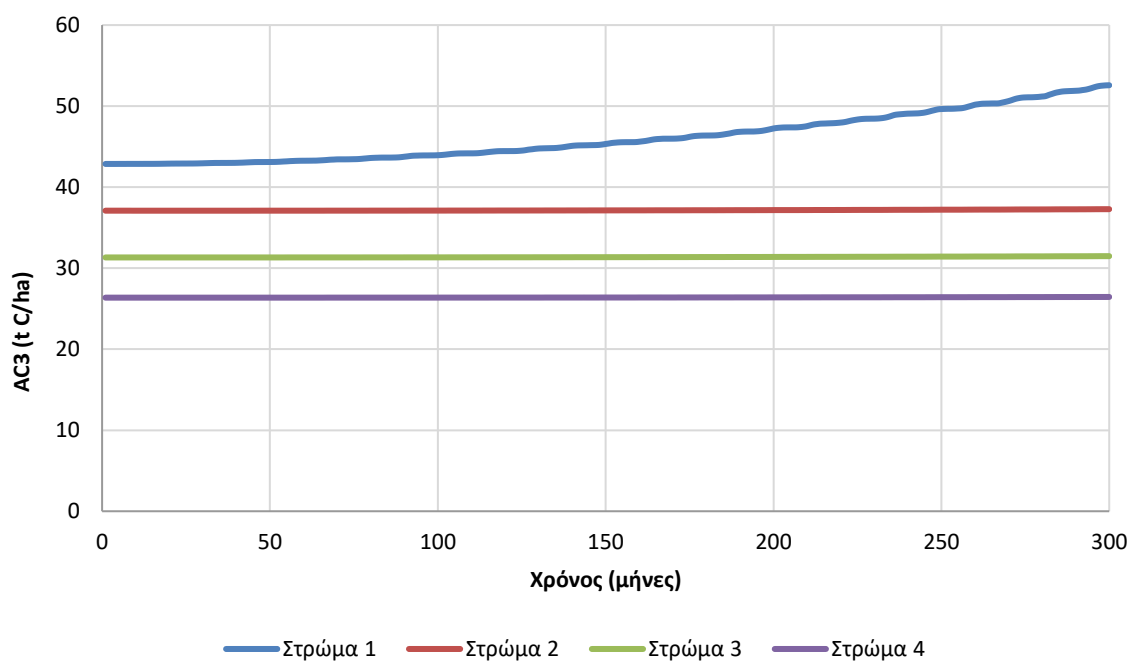
Διάγραμμα 3.34. Εδαφικός οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) μετά την προσθήκη κόμποστ



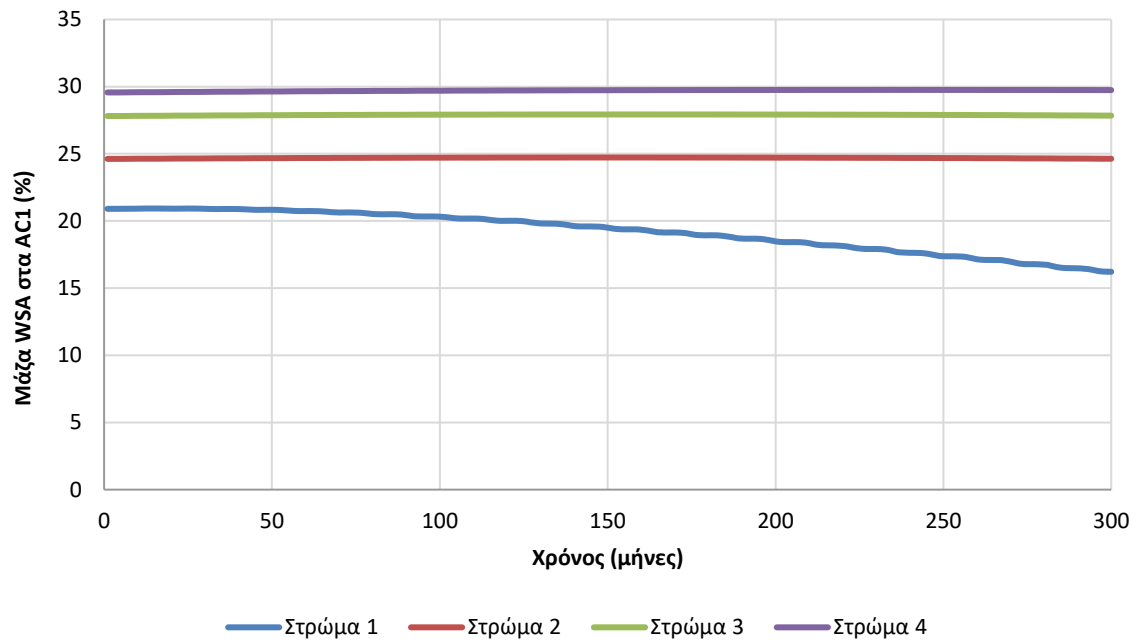
Διάγραμμα 3.35. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) συσσωματωμάτων μεγέθους ιλύος-αργίλου  $<53\mu m$  (AC1) μετά την προσθήκη κόμποστ



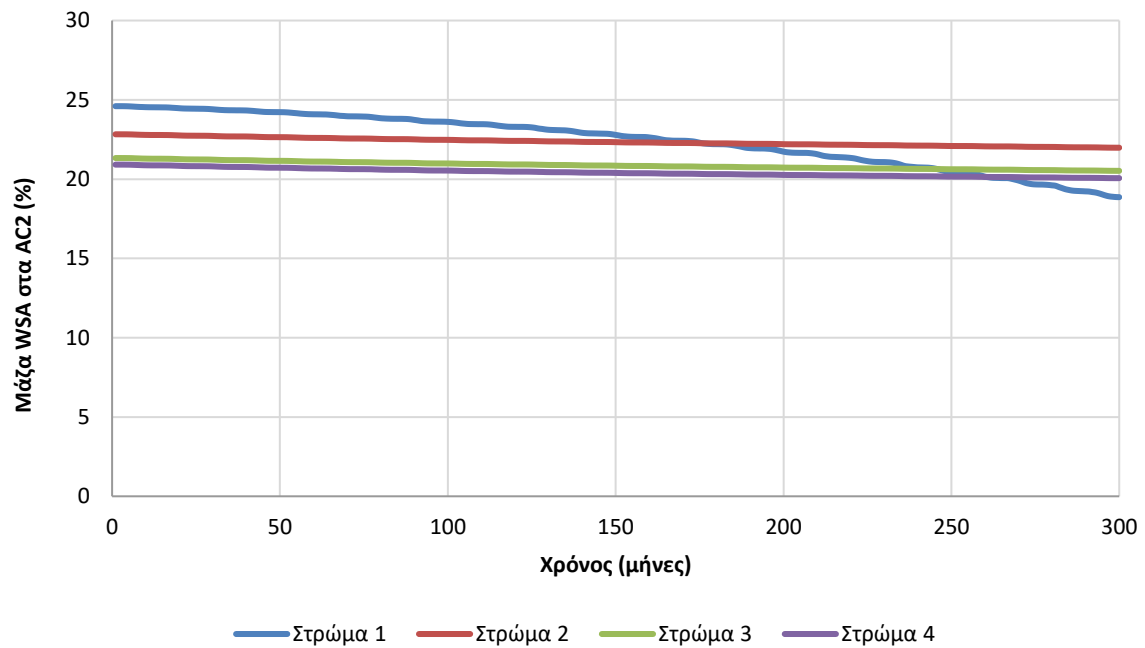
Διάγραμμα 3.36. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) συσσωματωμάτων μεγέθους 53-250 $\mu m$  (AC2) μετά την προσθήκη κόμποστ



Διάγραμμα 3.37. Οργανικός άνθρακας ( $tC\ ha^{-1}$ ) συσσωματωμάτων μεγέθους >250 $\mu m$  (AC3) μετά την προσθήκη κόμποστ

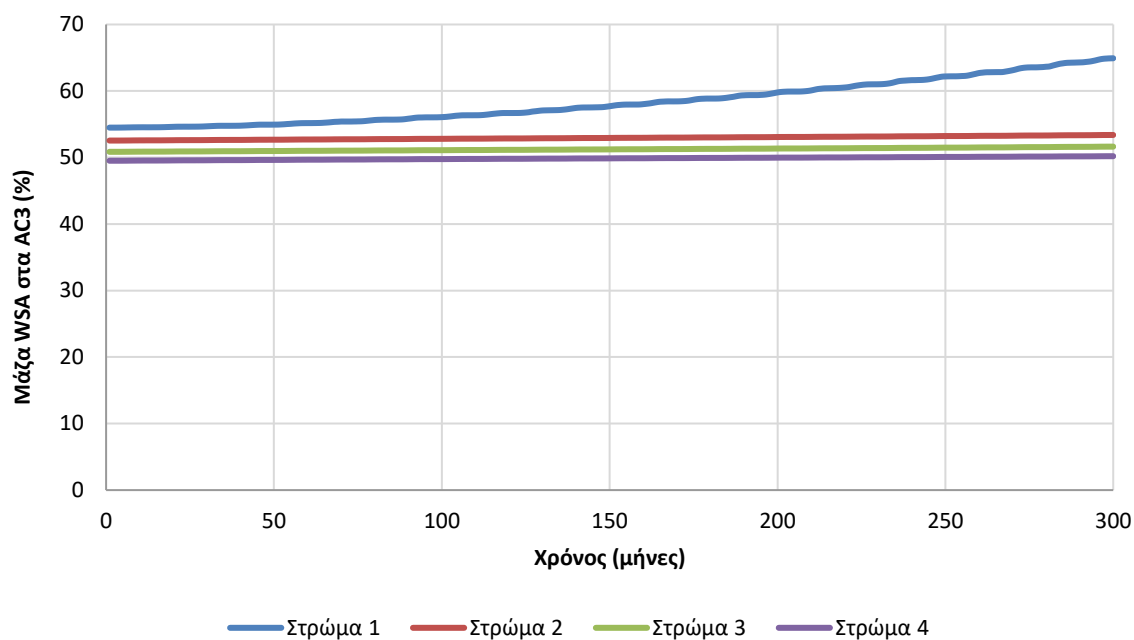


Διάγραμμα 3.38. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου <53 $\mu$ m (AC1) μετά την προσθήκη κόμποστ



Διάγραμμα 3.39. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους 53-250 $\mu$ m (AC2) μετά την προσθήκη κόμποστ

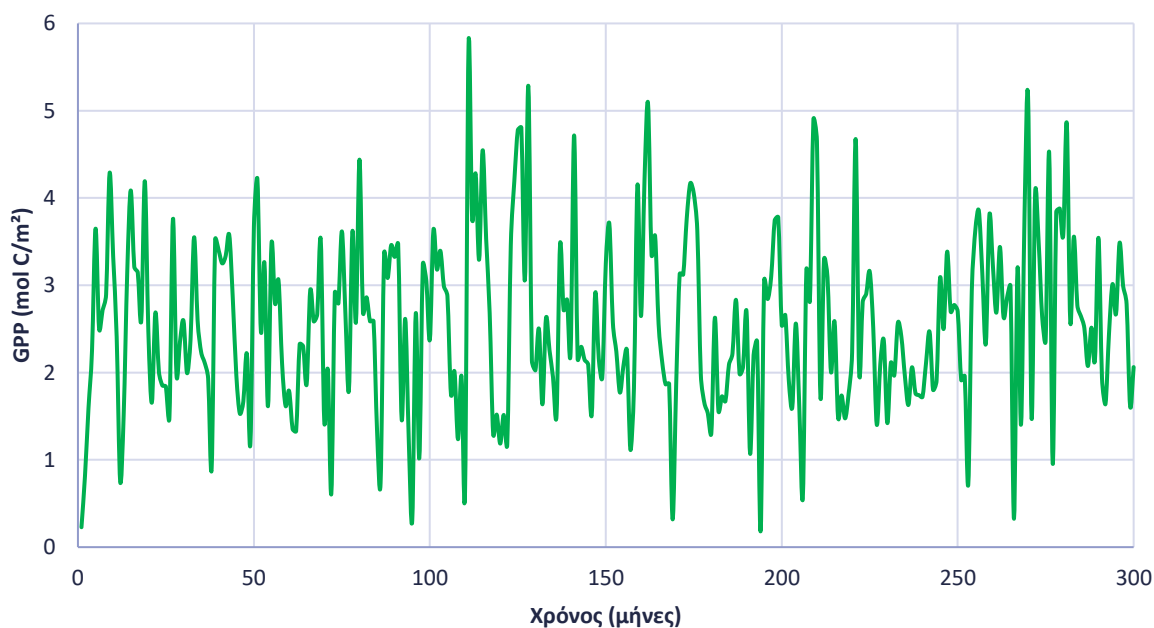




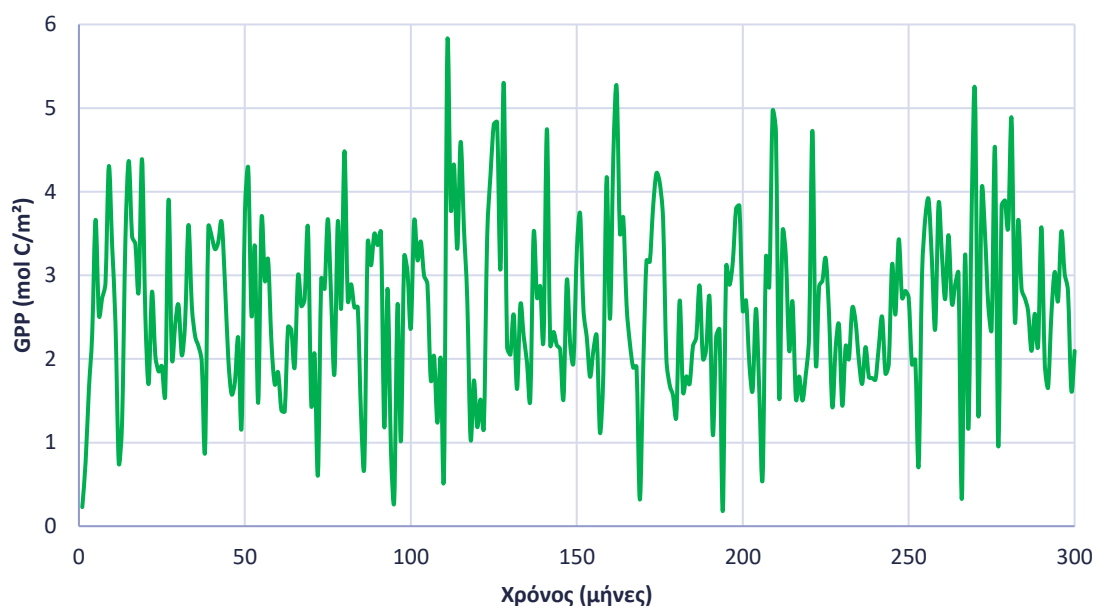
Διάγραμμα 3.40. Μάζα υδατοσταθερών (WSA) στα συσσωματώματα μεγέθους  $>250\mu\text{m}$  (AC3) μετά την προσθήκη κόμποστ

## ii) Ακαθάριστη Πρωτογενής Παραγωγή (GPP)

Στο Διάγραμμα 3.41 παρουσιάζεται η αρχική διακύμανση της GPP ( $\text{mol C m}^{-2}$ ) ενώ στο Διάγραμμα 3.42 απεικονίζεται η διακύμανσή της μετά την προσθήκη  $3 \text{ tC ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  εδαφοβελτιωτικού (κόμποστ). Προκύπτει, ότι με την προσθήκη οργανικής ύλης η GPP αυξάνεται απειροελάχιστα (αμελητέα) και κυμαίνεται μεταξύ 0.19 και  $5.8 \text{ mol C m}^{-2}$ .



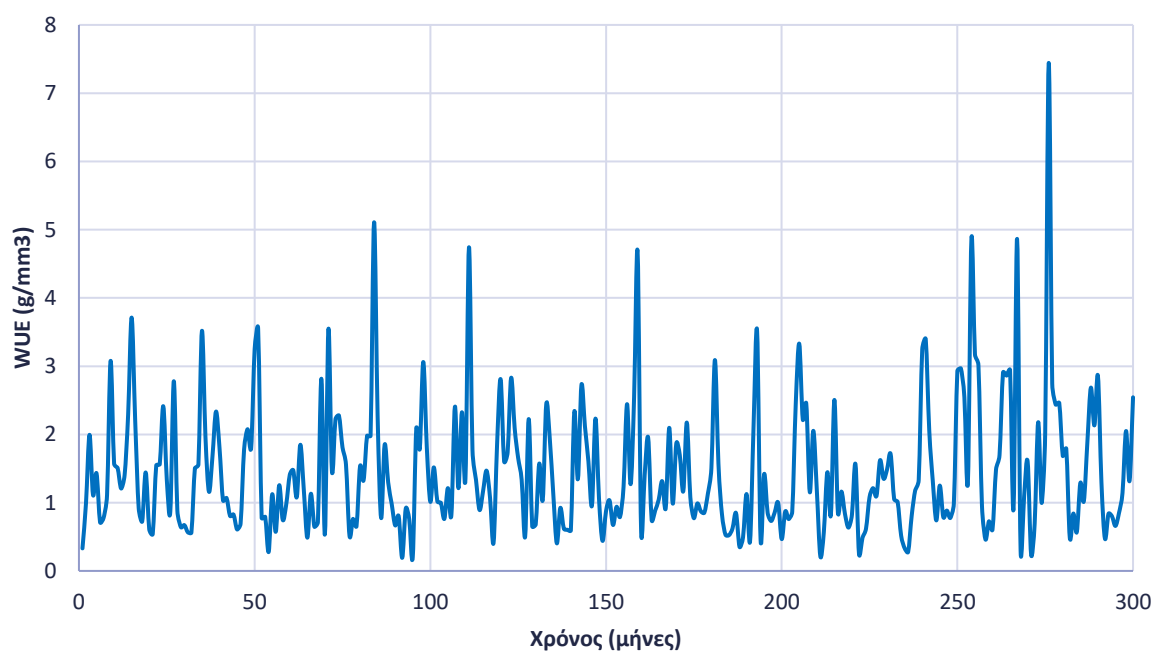
Διάγραμμα 3.41. Αρχική διακύμανση της GPP ( $\text{mol C m}^{-2}$ )



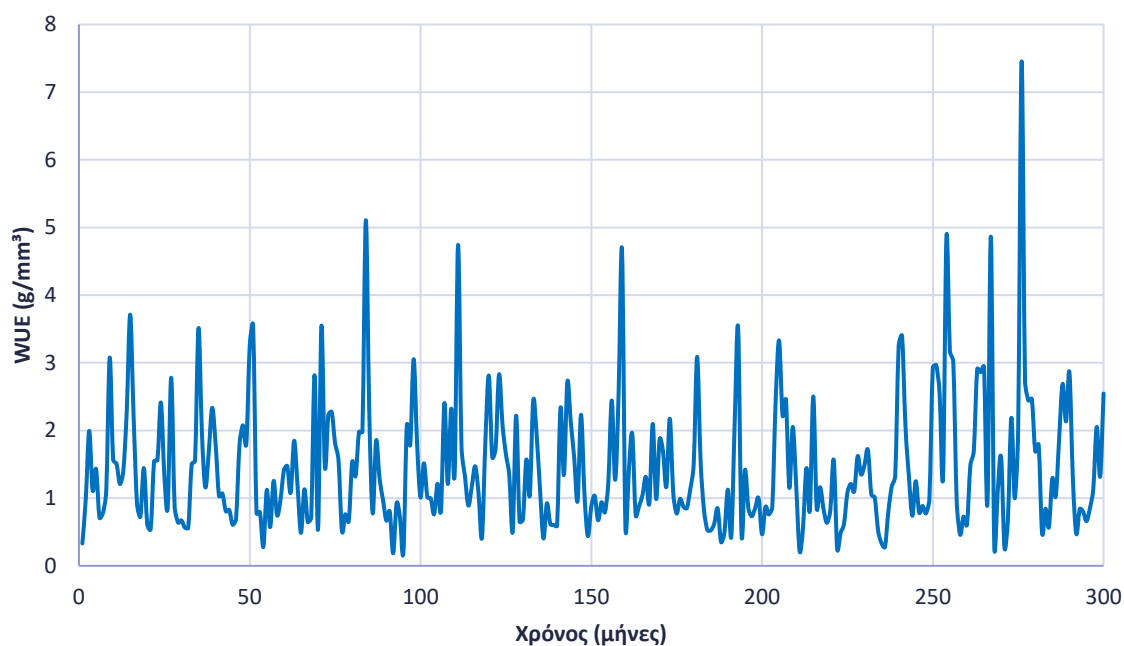
Διάγραμμα 3.42. Διακύμανση της GPP ( $\text{mol C m}^{-2}$ ) μετά την προσθήκη οργανικής ύλης

### iii) Αποδοτικότητα χρήσης νερού (WUE)

Όσον αφορά το WUE, η αρχική διακύμανσή του παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.43 ενώ η διακύμανση κατόπιν προσθήκης εδαφοβελτιωτικού στο Διάγραμμα 3.44. Παρατηρείται ότι ομοίως με την GPP, το WUE αυξάνεται απειροελάχιστα μετά την προσθήκη οργανικής ύλης υπό μορφής κόμποστ.



Διάγραμμα 3.43. Αρχικό WUE ( $\text{g mm}^{-3}$ )



Διάγραμμα 3.44.  $WUE$  ( $g\ mm^{-3}$ ) μετά την προσθήκη οργανικής ύλης

#### iv) Εδαφική υγρασία (Soil Moisture)

Σχετικά με την υγρασία του εδάφους, στην πάροδο των 25 ετών (1996–2020) παρατηρείται αύξηση της υγρασίας με την τελική υγρασία να είναι διπλάσια της αρχικής (Πιν.3.1). Βέβαια, ο διπλασιασμός της εδαφικής υγρασίας δεν είναι απόρροια της προσθήκης οργανικής ύλης.

Πίνακας 3.1. Αρχική και τελική υγρασία εδάφους με και χωρίς προσθήκη κόμποστ

Εδαφικό στρώμα	Αρχική εδαφική υγρασία (1996)	Τελική εδαφική υγρασία (2020)
1	0.201	0.422
2	0.201	0.422
3	0.201	0.421
4	0.201	0.421

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα μέσο διεξοδικής ανάλυσης, μοντελοποίησης και προσομοίωσης των εδαφικών λειτουργιών του δασικού οικοσυστήματος Zöbelboden σε επίπεδο είδους δέντρου (*Picea abies*) κάνοντας χρήση του μονοδιάστατου ολοκληρωμένου μοντέλου κρίσιμης ζώνης (1D-ICZ). Εκπονήθηκε στα πλαίσια του αναπτυξιακού, ερευνητικού έργου με τίτλο «eLTER – European Long–Term Ecosystem and socio–ecological Research Infrastructure» και αποτελεί μια καινοτόμο εργασία που μελετά τους παράγοντες που επηρεάζουν την ακαθάριστη πρωτογενή παραγωγή (GPP). Πιο συγκεκριμένα, τα συμπεράσματα που εξάγονται από την εν λόγω μελέτη είναι:

1. Ο κυριότερος περιοριστικός παράγοντας της φυτικής ανάπτυξης των *Picea abies* είναι ο φώσφορος (P) ο οποίος ελαττώνει την παραγωγή βιομάζας και κατ' επέκταση την πρόσληψη των θρεπτικών συστατικών C, N, K, Ca και Mg.
2. Η μηνιαία παραγωγή ολικής βιομάζας C του είδους δέντρου *Picea abies* στην πάροδο της 25ετίας (1996-2020) παρουσιάζει αυξητική τάση από τα 53.7 στα 82.3 mol m<sup>-2</sup>, με το λιγότερο παραγωγικό έτος το 1996 και το περισσότερο αποδοτικό το 2020.
3. Ο οργανικός άνθρακας (OC) που δεσμεύεται στο έδαφος είναι αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης των φυτικών υπολειμμάτων (litterfall) αφού δεν πραγματοποιούνται τεχνικές διαχείρισης όπως εφαρμογή εδαφοβελτιωτικών, κοπριάς, λιπασμάτων κλπ.
4. Η μεγαλύτερη ποσότητα οργανικού άνθρακα περιέχεται στα μακρο-συσσωματώματα μεγέθους >250μm (AC3) και η μικρότερη στα συσσωματώματα μεγέθους ιλύος-αργίλου μεγέθους <53μm (AC1).
5. Τα υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA) αποτελούν το 50 – 55% της μάζας των AC3, το 21 – 25% της μάζας των AC2 και το 21 – 30% της μάζας των AC1.
6. Τα K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> και SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> του εδαφικού διαλύματος (στρώμα 0-10cm) προέρχονται κυρίως από τις κατακρημνίσεις (βροχόπτωση) και είναι της τάξης των 10<sup>-5</sup> mol L<sup>-1</sup> ενώ τα Ca<sup>2+</sup> και Mg<sup>2+</sup> πηγάζουν από τη διάλυση του ορυκτού δολομίτη.
7. Κατά τη διάρκεια των 25 ετών παρατηρήθηκαν φαινόμενα έντονης μετεωρολογικής ξηρασίας (RDI > -1.5) τους μήνες Φεβρουάριο-Μάιο 2001, Οκτώβριο 2003-Μάιο 2004, Ιούλιο-Δεκέμβριο 2011, Ιούνιο-Ιούλιο 2014 και Σεπτέμβριο 2015-Απρίλιο 2016.
8. Ο δείκτης ανταπόκρισης (Response Index) συσχετίζεται άμεσα με το δείκτη ξηρασίας (Drought Index) καθώς το 94% της μεταβολής του οφείλεται στο δείκτη ξηρασίας. Όσο αυξάνεται η ένταση της ξηρασίας τόσο αυξάνεται και η ανταπόκριση της GPP σ' αυτή.
9. Ο δείκτης ανθεκτικότητας της GPP (Resilience Index) επηρεάζεται από το δείκτη ξηρασίας (Drought Index) αφού το 66% της μεταβολής του οφείλεται στο δείκτη

ξηρασίας. Όταν αυξάνεται η ένταση της ξηρασίας αυξάνεται και η ανθεκτικότητα της GPP.

10. Τα έλατα Νορβηγίας (*Picea abies*) είναι ανθεκτικά και ανταποκρίνονται σε φαινόμενα ξηρασίας και δεν οδηγούνται στο θάνατο (dieback).
11. Η εφαρμογή εδαφοβελτιωτικού ενίσχυσε τη δέσμευση του οργανικού άνθρακα του 1<sup>ου</sup> εδαφικού στρώματος (0-10cm) και επίσης, του οργανικού άνθρακα (1<sup>η</sup> στρώση) στα κλάσματα συσσωματωμάτων AC1 (<53μm) και AC3 (>250μm). Επιπλέον, αύξησε τα υδατοσταθερά μακρο-συσσωματώματα (AC3) τα οποία είναι δείκτης της ποιότητας του εδάφους.
12. Η προσθήκη οργανικής ύλης (κόμποστ) αύξησε απειροελάχιστα (αμελητέα) την Ακαθάριστη Πρωτογενή Παραγωγή (GPP) και το WUE, ενώ δεν παρατηρήθηκαν αλλαγές στην εδαφική υγρασία (soil moisture).
13. Γενικότερα, το μοντέλο 1D-ICZ αναπαρέστησε επιτυχώς όλες τις διεργασίες που επιτελεί το έδαφος όπως τη δυναμική της βιομάζας, την πρόσληψη θρεπτικών συστατικών και τα αποθέματα C και N στα διάφορα μέρη του είδους δέντρου *Picea abies*. Επιπροσθέτως, προσομοίωσε τη δυναμική σχηματισμού των συσσωματωμάτων, τα υδατοσταθερά συσσωματώματα (WSA) και τον οργανικό άνθρακα σε όλη τη μάζα του εδάφους καθώς και στα κλάσματα AC1, AC2, AC3. Τέλος, το μοντέλο ήταν ικανό να προσομοιώσει την ροή και μεταφορά διαλυτών ουσιών του εδαφικού διαλύματος και τη διάλυση ορυκτών (δολομίτη).

Κάποιες προτάσεις που θα ήταν χρήσιμες συνεισφέροντας στον τομέα της επιστήμης και της έρευνας σε θέματα υδρογεωχημικής μηχανικής είναι οι εξής:

1. Επικαιροποίηση και διόρθωση των μετρήσεων του Flux Tower για να επιτευχθεί καλύτερη βαθμονόμηση, προσαρμογή και σύγκριση της φυτικής ανάπτυξης και παραγωγής.
2. Δειγματοληψία μάζας χώματος από το δασικό οικοσύστημα Zöbelboden και επιτέλεση διαδικασιών όπως κλασματοποίηση συσσωματωμάτων στα AC1, AC2, AC3 (WSA Fractionation), διόρθωση άμμου (Sand Correction Procedure) δηλαδή, προσδιορισμός του περιεχομένου άμμου και ιλύος-αργίλου στα κλάσματα συσσωματωμάτων AC2, AC3 κ.α. Τα εργαστηριακά αποτελέσματα των διαδικασιών αυτών θα βοηθήσουν στην καλύτερη προσομοίωση και προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στις μετρήσεις πεδίου.
3. Τροποποίηση κώδικα μοντέλου SAFE Weathering, με προσθήκη ορυκτών, παραμέτρων διάλυσης κλπ. με απώτερο στόχο την προσομοίωση όλων των διαλυτών ουσιών του εδαφικού διαλύματος.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### A. Ξενόγλωσση

- Anderson, S. P., von Blanckenburg, F., White, A. F. (2007). *Physical and Chemical Controls on the Critical Zone*. Elements, 3, 319
- Banwart, S. A., Nikolaidis, N. P., Zhu, Y. G., Peacock, C. L., Sparks, D. L. (2019). *Soil Functions: Connecting Earth's Critical Zone*. Annu. Rev. Earth Planet Sci., 47, 335 & 348-350
- Bissanti, G. (2018). *Picea abies*. <https://antropocene.it/en/2018/10/08/picea-abies/> [05/2022]
- Blanco-Canqui, H., Lal, R. (2010). *Mechanisms of Carbon Sequestration in Soil Aggregates*. Critical Reviews in Plant Sciences, 23, 483-484 & 490
- Breida, M., Younssi, S. A., Ouammou, M., Bouhria, M., Hafsi, M. (2019). *Pollution of Water Sources from Agricultural and Industrial Effluents: Special Attention to NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cr (VI), and Cu (II)*. Water Chemistry, 5
- Bronick, C. J., Lal, R. (2005). *Soil structure and management: a review*. Geoderma, 124, 3-4
- Brundrett, M. C., Ferguson, B. J., Gressshoff, P. M., Mathesius, U., Munns, R., Rasmussen, A., Ryan, M. H., Schmidt, S., Watt, M. (2010). Nutrient uptake from soils. *Plants in action*, Australian Society of Plant Scientists, New Zealand Society of Plant Biologists, and New Zealand Institute of Agricultural and Horticultural Science, 5
- Chapin III, F. S., Matson, P. A., Vitousek, P. M. (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer, 2<sup>nd</sup> edition
- Coleman, K., Jenkinson, D. S. (2014). *RothC - A model for the turnover of carbon in soil: Model description and users guide*. Rothamsted Research, Harpenden, UK, 5 & 8
- Ding, Y., Schoengold, K., Tadesse, T. (2009). *The Impact of Weather Extremes on Agricultural Production Methods: Does Drought Increase Adoption of Conservation Tillage Practices?*. Journal of Agricultural and Resource Economics, 34, 405
- Editors of Encyclopaedia Britannica, *water cycle*. <https://www.britannica.com/science/water-cycle> [04/2022]
- Editors of iFlora, *Acer pseudoplatanus* L. *Sycamore*. <https://www.i-flora.com/en/the-smartphone-apps/iflora-baeume/species/art/show/acer-pseudoplatanus-1.html> [05/2022]
- Editors of iFlora, *Fraxinus excelsior* L. *Ash*. <https://www.i-flora.com/en/image-search/phylogenetic-tree/art/showgallery/fraxinus-excelsior.html> [05/2022]
- Editors of Lenntech, *Sulfur cycle Part IV of "Matter cycles": The sulfur cycle*. <https://www.lenntech.com/sulphur-cycle.htm> [04/2022]
- Editors of National Drought Mitigation Center, *Types of Drought METEOROLOGICAL DROUGHT*. University of Nebraska, <https://drought.unl.edu/Education/DroughtIn-depth/TypesofDrought.aspx> [07/2022]

Editors of Science Facts.net, Sulfur Cycle What is the sulfur cycle?. <https://www.sciencefacts.net/sulfur-cycle.html> [04/2022]

European Commission, (2002). *Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: towards a thematic strategy for soil protection*, 179, 7-12 & 15-16

Hartmann, A., Kobler, J., Kralik, M., Dirnböck, T., Humer, F., Weiler, M. (2016). *Model-aided quantification of dissolved carbon and nitrogen release after windthrow disturbance in an Austrian karst system*. Biogeosciences, 13, 160-161

Hartmann, A., Kralik, M., Humer, F., Lange, J., Weiler, M. (2011). *Identification of a karst system's intrinsic hydrodynamic parameters: upscaling from single springs to the whole aquifer*. Environ Earth Sci, 65, 2378

Hatfield, J. L., Dold, C. (2019). *Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate*. Front. Plant Sci, 10, 1-3 & 6-7

Helm, N., Essl, F., Mirtl, M., Dirnböck, T. (2017). *Multiple environmental changes drive forest floor vegetation in a temperate mountain forest*. Ecology and Evolution, Wiley, 7, 3

Keyantash, J., Dracup, J. A. (2002). *The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices*. American Meteorological Society, 83, 1171-1172 & 1175-1176

Li, X. Y., Lin, H., Levia, D. F. (2012). *Coupling Ecohydrology and Hydropedology at Different Spatio-Temporal Scales in Water-Limited Ecosystems*. Hydropedology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology, 738

Lin, H. (2010). *Earth's Critical Zone and hydropedology: concepts, characteristics, and advances*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 14, 26

Medrano, H., Tomàs, M., Martorell, S., Flexas, J., Hernández, E., Roselló, J., Pou, A., Escalona, J. M., Bota, J. (2015). *From leaf to whole-plant water use efficiency (WUE) in complex canopies: Limitations of leaf WUE as a selection target*. The Crop Journal, 3, 221

Mishra, A. K., Singh, V. P. (2010). *A review of drought concepts*. Journal of Hydrology, 391, 203 & 206-207

Nikolaidis, N. P., Valstar, J., Rowe, E. C., Moirgiorgou, K., Kotronakis, E., Giannakis, G. V., Stamati, F. E., Banwart, S. A. (2014). *Integrated Critical Zone Model (1D-ICZ Model) - A Tool for Dynamic Simulation of Soil Functions and Soil Structure - Technical Manual*. School of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Chania, Greece, 9 & 12 & 14-16 & 21 & 76

Proell, G., Dirnboeck, T., *LTER Zöbelboden – Austria*. <https://deims.org/8eda49e9-1f4e-4f3e-b58e-e0bb25dc32a6> [04/2022] (1)

Proell, G., Dirnboeck, T., *LTER Zöbelboden IP1*. <https://deims.org/locations/85dc6019-9654-4ba0-8338-08c4ffe8fe47> [05/2022] (2)

Segoli, M., De Gryze, S., Dou, F., Lee, J., Post, W. M., Denef, K., Six, J. (2013). *AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies*. Ecological Modelling, 263, 2-3

Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M. T. (2009). *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and*

*Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*. Department of Environmental Sciences University of Riverside California, 45-47

Stamati, F. E., Nikolaidis, N. P., Banwart, S., Blum, W. E. H. (2013). *A coupled carbon, aggregation and structure turnover (CAST) model for topsoils*. *Geoderma*, 211-212, 51-56

Steduto, P. (1996). *Water Use Efficiency, Sustainability of Irrigated Agriculture*. Dordrecht, 312, 194tisd

Tigkas, D., Vangelis, H., Tsakiris, G. (2015). *DrinC: a software for drought analysis based on drought indices*. *Earth Science Informatics*, 8, 4-5

Tisdall, J. M., Oades, J. M. (1982). *Organic matter and water-stable aggregates in soils*. *Journal of Soil Science*, 33, 141-143

Ugolini, F. C., Spaltenstein, H. (1992). *7 Pedosphere*. *International Geophysics*, 50, 123

Wambua, R. M., Mutua, B. M., Raude, J. M. (2017). *Characterization of Temporal and Spatial Drought Risk Events Using Surface Water Supply Index (SWSI) in a Tropical River Basin*. *MOJ Civil Eng.*, 2, 45

Wilpiseski, R. L., Aufrecht, J. A., Retterer, S. T., Sullivan, M. B., Graham, D. E., Pierce, E. M., Zablocki, O. D., Palumbo, A. V., Elias, D. A. (2019). *Soil Aggregate Microbial Communities: Towards Understanding Microbiome Interactions at Biologically Relevant Scales*. *Appl Environ Microbiol.*, 85, 3

Xiao, J., Chevallier, F., Gomez, C., Guanter, L., Hicke, J. A., Huete, A. R., Ichii, K., Ni, W., Pang, Y., Rahman, A. F., Sun, G., Yuan, W., Zhang, L., Zhang, X. (2019). *Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years*. *Remote Sensing of Environment*, 233, 111383



## **B. Ελληνική**

Άγρια Μανιτάρια, <https://www.agriamanitaria.gr/abies-alba-%CE%BB%CE%B5%CF%85%CE%BA%CE%AE-%CE%B5%CE%BB%CE%AC%CF%84%CE%B7/> [05/2022]

Άγρια Μανιτάρια, <https://www.agriamanitaria.gr/fagus-sylvatica-%CE%B4%CE%B1%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE-%CE%BF%CE%BE%CE%B9%CE%AC/> [05/2022]

Άγρια Μανιτάρια, <https://www.agriamanitaria.gr/larix-decidua-%CE%BB%CE%AC%CF%81%CE%B9%CE%BA%CE%B1%CF%82-%CE%BF-%CE%BA%CE%BF%CE%B9%CE%BD%CF%8C%CF%82-2/> [05/2022]

Βαβίζος, Γ., Μερτζάνης, Α. (2003). *Περιβάλλον: Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων*. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2<sup>η</sup> έκδοση

Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, <https://www.eea.europa.eu/el/simata-eop-2010/simata-2019/grafikes-plirofories/o-kyklos-ton-threptikon-stoicheion/view> [04/2022]

Ζιώβα, Β. (2012). Σύσταση Εδάφους – Κοκκομετρική σύσταση, *Διερεύνηση της θρεπτικής κατάστασης γεωργικών εδαφών στο νομό Αιτωλοακαρνανίας*. Σχολή Τεχνολόγων Γεωπόνων, Τμήμα Μηχανολογίας και Υδάτινων Πόρων, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Μεσολογίου, 6

Λουκής, Δ. Η. (2010). *Ανάλυση μεθοδολογιών μοντελοποίησης και πρόβλεψης συμπεριφοράς πολύπλοκων κοινωνικών συστημάτων, με εφαρμογές στη Δημόσια Διοίκηση & Ηλεκτρονική Διακυβέρνηση με τη χρήση Νέων Τεχνολογιών Πληροφορικής*. Σχολή Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 44-46 & 49-51 & 54 & 57-58 & 66-69

Τερζίδης, Γ. Α., Παπαζαφειρίου, Ζ. Γ. (1997). *Γεωργική Μηχανική*. Εκδόσεις Ζήτη

Τσακίρης, Γ. (2013). *ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ: Ι. Τεχνική Υδρολογία και Εισαγωγή στη διαχείριση υδατικών πόρων*. Εκδόσεις Συμμετρία, 2<sup>η</sup> έκδοση

Χατζημπίρος, Κ. (2014). *Οικολογία: Οικοσυστήματα και προστασία του περιβάλλοντος*. Εκδόσεις Συμμετρία, 3<sup>η</sup> έκδοση

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Ι: Εγχειρίδιο (Manual) στησίματος μοντέλων HYDRUS-1D, CAST, PROSUM, SAFE Weathering και 1D-ICZ για 60 μήνες

### INTRODUCTION

The 1D integrated critical zone model (1D-ICZ) is developed within the EU-project SoilTrEC and it combines the following:

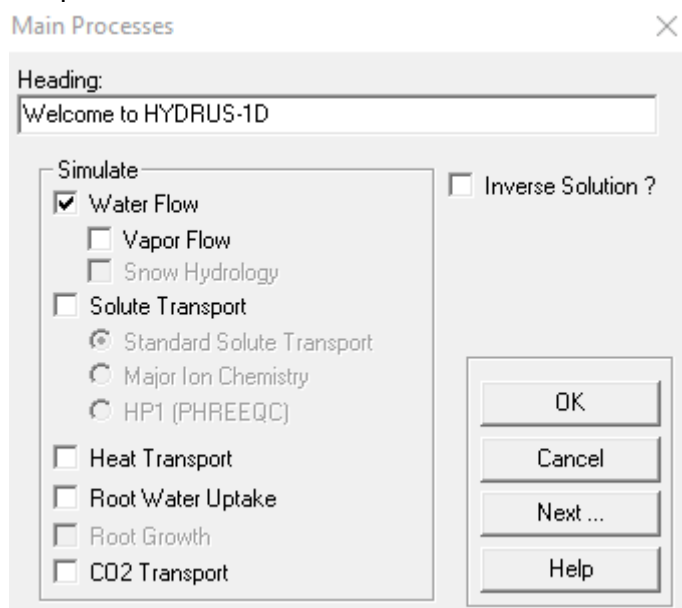
1. HYDRUS-1D model
2. Chemical equilibrium model
3. Safe Weathering model
4. PROSUM model
5. CAST model
6. Bioturbation model
7. Kinetic model

### SET UP HYDRUS-1D MODEL

For 5 years= 5 \* 12 months= 60 months= 60 months ·  $30.43 \frac{\text{days}}{\text{month}}$  = 1,825.8 days

#### A. Make the flow model

1. Open Hydrus-1D
2. Select File→ New. Enter name and description and browse to the desired directory
3. Select option “Main processes” and select “Water flow”



4. Select “Next” to go to the next input window
5. In the “Geometry Information” window:
  - Select “m” for length unit

- Adapt “number of soil materials” and “number of layers for mass balance”
- Adapt the desired depth of the soil profile

**Geometry Information** ✕

<b>Length Units</b> <input type="radio"/> mm <input type="radio"/> cm <input checked="" type="radio"/> m	<input type="text" value="2"/>	Number of Soil Materials
	<input type="text" value="4"/>	Number of Layers for Mass Balances
	<input type="text" value="1"/>	Decline from Vertical Axes (=1: vertical; =0: horizontal)
	<input type="text" value="0.4"/>	Depth of the Soil Profile [cm]

6. Select “Next” to go to the next input window
7. In the “Time Information” window:
  - Select “days” for the time unit
  - Adapt initial time to 0.001 day
  - Adapt the final time
  - Select the “Time-Variable Boundary Conditions” option
  - Adapt the number of time variable boundary records

**\*\*Adapt the number of time variable boundary records. This value depends on how often you want to use different values for your boundary condition, such as rainfall, evaporation, temperature or solute concentrations during your simulation.**

**Time Information** ✕

<b>Time Units</b> <input type="radio"/> Seconds <input type="radio"/> Minutes <input type="radio"/> Hours <input checked="" type="radio"/> Days <input type="radio"/> Years	<b>Time Discretization</b>	
	Initial Time [day]:	<input type="text" value="0.001"/>
	Final Time [day]:	<input type="text" value="1825.8"/>
	Initial Time Step [day]:	<input type="text" value="0.001"/>
	Minimum Time Step [day]:	<input type="text" value="1e-005"/>
	Maximum Time Step [day]:	<input type="text" value="4.99999"/>

**Time-Variable Boundary Conditions**

☒ Time-Variable Boundary Conditions

Number of Time-Variable Boundary Records (e.g., Precipitation)

☐ Repeat the same set of BC records n times:

☐ Daily Variations of Transpiration During Day Generated by HYDRUS

☐ Sinusoidal Variations of Precipitation Generated by HYDRUS

**Meteorological Data**

☐ Meteorological Data

Number of Meteorological Records (e.g., Radiation)

☒ Penman-Montheith Equation

☐ Hargreaves Formula

☐ Energy Balance Boundary Condition

☐ Daily Variations of Meteo Data During Day Generated by HYDRUS

8. Select “Next” to go to the next input window
9. Select the above:

Print Information

Print Options

☒ T-Level Information  
Every n time steps: 1

☐ Print at Regular Time Interval  
Time Interval [day]: 1

☒ Screen Output

☒ Print Fluxes (instead of Temp) for Observation Nodes

☒ Hit Enter at End?

Print Times

Number of Print Times: 1

Select Print Times ...

OK  
Cancel  
Previous ...  
Next ...  
Help

10. To the print information window:

- Adapt the Number of print times if you wish to make figures using the Hydrus-1D GUI
- Click “Select Print Times” and select a number of print times by adapting them manually or use the Default option. Then click “OK”

Print-Times

	1
Print Times [day]	1825.8

Default (log) Default OK Cancel

11. Select “Next” to go to the next input window

12. To the Iteration criteria:

- Adapt the “Lower time step multiplication factor” to 1.6 in order to increase time step size faster if the solution of a time step is reached quickly.

Iteration Criteria

10	Maximum Number of Iterations
0.001	Water Content Tolerance
0.01	Pressure Head Tolerance [m]

Time Step Control

3	Lower Optimal Iteration Range
7	Upper Optimal Iteration Range
1.6	Lower Time Step Multiplication Factor
0.7	Upper Time Step Multiplication Factor

Internal Interpolation Tables

1e-008	Lower Limit of the Tension Interval [m]
100	Upper Limit of the Tension Interval [m]

OK  
Cancel  
Previous ...  
Next ...  
Help

13. Select "Next" to go to the next input window

14. To the Soil Hydraulic model:

- Choose Van Genuchten - Mualem relationship without the air entry value option
- Choose "no hysteresis"

Soil Hydraulic Model

Hydraulic Model

Single Porosity Models

☒ van Genuchten - Mualem  
☐ With Air-Entry Value of -2 cm

☐ Modified van Genuchten  
☐ Brooks-Corey  
☐ Kosugi (log-normal)

Dual-Porosity/Dual-Permeability Models

☐ Dual-porosity (Durner, dual van Genuchten - Mualem)  
☐ Dual-porosity (mobile-immobile, water c. mass transfer)  
☐ Dual-porosity (mobile-immobile, head mass transfer)  
 == Models below are recommended only for experienced users ==  
☐ Dual-permeability (Kinematic wave equation)  
☐ Dual-permeability (Gerke and van Genuchten, 1993)

☐ Look-up Tables

Hysteresis

☒ No hysteresis  
☐ Hysteresis in retention curve  
☐ Hysteresis in retention curve and conductivity  
☐ Hysteresis in retention curve (no pumping, Bob Lenhard)  
☐ Initially drying curve  
☐ Initially wetting curve

OK  
Cancel  
Previous ...  
Next ...  
Help

15. Select "Next" to go to the next input window

16. To the Water flow properties:

Enter the hydraulic parameters of the van Genuchten-Mualem hydraulic model for all soil types manually or use the values from the Soil Catalogue

Water Flow Parameters

Mat	Qr [-]	Qs [-]	Alpha [1/m]	n [-]	Ks [m/day]	I [-]
1	0.078	0.43	3.6	1.56	0.2496	0.5
2	0.078	0.43	0.036	1.56	24.96	0.5

Soil Catalog: Loam Neural Network Prediction ☐ Temperature Dependence

OK Cancel Previous ... Next ... Help

17. Select "Next" to go to the next input window

18. To the Water flow boundary conditions:

- Select "Atmospheric Boundary Conditions (BC) with surface layer" for the upper boundary conditions
- Select "Free Drainage" for the lower boundary condition
- Select "In Water Contents" for the initial condition

Water Flow Boundary Conditions

Upper Boundary Condition

☐ Constant Water Content  
☐ Constant Flux  
☒ Atmospheric BC with Surface Layer  
☐ Atmospheric BC with Surface Run Off  
☐ Variable Pressure Head  
☐ Variable Pressure Head/Flux  
☐ Triggered Irrigation

Lower Boundary Condition

☐ Constant Water Content  
☐ Constant Flux  
☐ Variable Pressure Head  
☐ Variable Flux  
☒ Free Drainage  
☐ Deep Drainage  
☐ Seepage Face; h =  
☐ Horizontal Drains

Initial Condition

☐ In Pressure Heads  
☒ In Water Contents

0 Max h at Soil Surface

OK Cancel Previous Next Help

19. Select "Next" to go to the next input window

20. To the Time variable boundary conditions:

You can enter values manually one by one or you can also paste data from excel files

- Time (day)
- Precipitation (m/month) → monthly precipitation data

- Evaporation (m/month) → monthly evapotranspiration data
- hCritA (m)= 1000m

Time Variable Boundary Conditions

	Time [day]	Precip. [m/day]	Evap. [m/day]	hCritA [m]	tTop [°C]	tBot [°C]	Ampl [°C]
1	30.4167	0.159	0.0213794	1000	0.555208	0	0
2	60.8333	0.0322667	0.0116244	1000	-0.981399	0	0
3	91.25	0.11615	0.0150651	1000	3.31344	0	0
4	121.667	0.091	0.0227659	1000	7.00846	0	0
5	152.083	0.1636	0.0310064	1000	11.1235	0	0
6	182.5	0.1426	0.0567628	1000	15.0755	0	0
7	212.917	0.0837	0.0715435	1000	19.487	0	0
8	243.333	0.0506	0.0730775	1000	20.0696	0	0
9	273.75	0.120462	0.0317543	1000	11.4932	0	0
10	304.167	0.094525	0.0181268	1000	7.54911	0	0
11	334.583	0.093	0.0159618	1000	7.73968	0	0
12	365	0.0892	0.00648198	1000	6.40625	0	0
13	395.417	0.135325	0.00757065	1000	0.400874	0	0
14	425.833	0.179833	0.0145878	1000	2.80251	0	0

OK Cancel Previous ... Next ... Help ... Add Line Delete Line Default Time

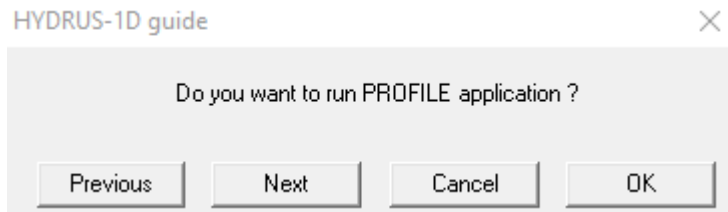
Time Variable Boundary Conditions

	Time [day]	Precip. [m/day]	Evap. [m/day]	hCritA [m]	tTop [°C]	tBot [°C]	Ampl [°C]
46	1399.17	0.072225	0.03164	1000	11.2493	0	0
47	1429.58	0.045	0.0139525	1000	5.42938	0	0
48	1460	0.339075	0.00727715	1000	1.32847	0	0
49	1490.42	0.28955	0.00417214	1000	-2.75343	0	0
50	1520.83	0.0836	0.0188296	1000	3.80437	0	0
51	1551.25	0.11745	0.0189693	1000	5.19368	0	0
52	1581.67	0.088	0.025422	1000	8.39299	0	0
53	1612.08	0.289883	0.0326715	1000	8.21196	0	0
54	1642.5	0.0623417	0.060676	1000	20.0869	0	0
55	1672.92	0.133362	0.0520606	1000	18.515	0	0
56	1703.33	0.0892	0.0596531	1000	18.3804	0	0
57	1733.75	0.11445	0.0253533	1000	13.4612	0	0
58	1764.17	0.1326	0.0299959	1000	11.9627	0	0
59	1794.58	0.0856951	0.0132852	1000	5.92535	0	0

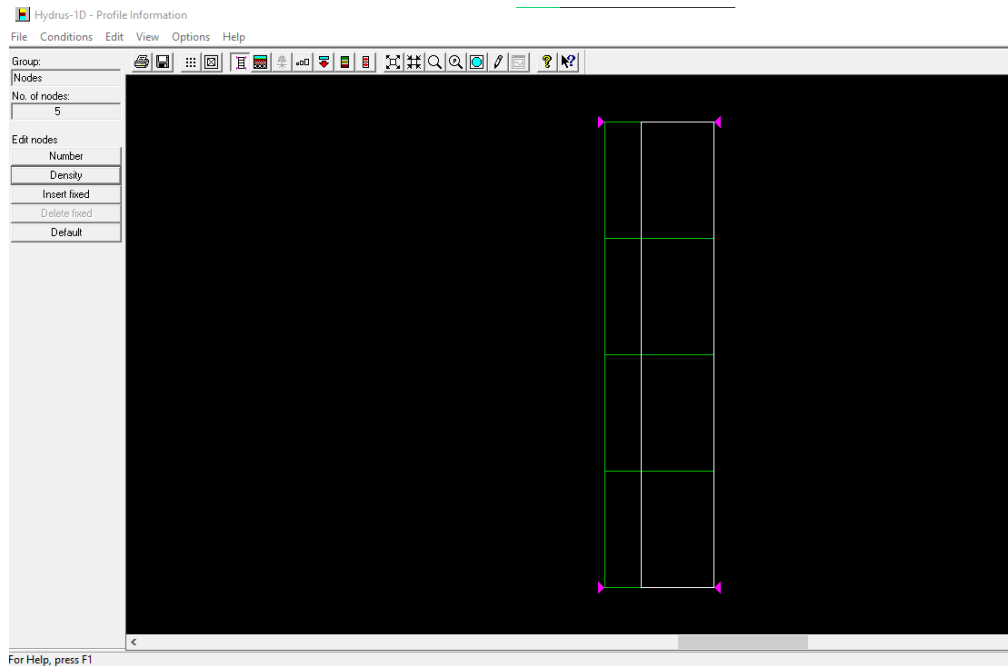
OK Cancel Previous ... Next ... Help ... Add Line Delete Line Default Time

21. Select "Next" to go to the next input window

22. Hydrus asks you: Do you want to run Profile application? Click OK



**23. Select Conditions→ Profile Discretization and change the number of nodes by selecting “Number” under Edit Nodes and change the value (=5)**



**24. File→ Exit and save your changes**

**25. To the Soil profile summary:**

- z is the z-coordinate with a value in the upper layer of 0 and the layers below should have an increasing positive z-coordinate.
- Theta is the initial water content
- Mat is the soil material number



Soil Profile Summary

	z [m]	theta	Root [1/m]	Axz	Bxz	Dxz	Mat
1	0	0.2	0	1	1	1	1
2	0.1	0.2	0	1	1	1	1
3	0.2	0.2	0	1	1	1	1
4	0.3	0.2	0	1	1	1	1
5	0.4	0.2	0	1	1	1	1

Set to Default Values    Set Initial Conditions Equal to Field Capacity

OK    Cancel    Previous    Next    Help

26. Select "Next" to go to the next input window  
 27. Hydrus ask if you want to run the model: Click OK

HYDRUS-1D guide

Do you want to run HYDRUS-1D application ?

Previous    Next    Cancel    OK

28.

Hydrus-1D Calculation: Zobelboden

Time	ItW	ItCum	vTop	SvTop	SvRoot	SvBot	hTop	hRoot	hBot
1823.5147	2	199696-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1823.6061	2	199698-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1823.7455	2	199700-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1823.8292	2	199712-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1823.8725	2	199724-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1823.9419	2	199726-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.0477	2	199728-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.1112	2	199740-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.2100	2	199742-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.2626	2	199754-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.3446	3	199757-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.3883	2	199769-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.4562	4	199773-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.5242	2	199775-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.5638	2	199787-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.6262	2	199789-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.7196	3	199792-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.7663	2	199804-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.8442	2	199806-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				
1824.8962	2	199818-0.88E-01-0.96E+02	0.00E+00-0.96E+02	-0.06	0.00-0.06				

Time ItW ItCum vTop SvTop SvRoot SvBot hTop hRoot hBot

1825.0000 10 199828-0.88E-01-0.96E+02 0.00E+00-0.96E+02 -0.06 0.00-0.06

Run time [sec] 7.39000001549721

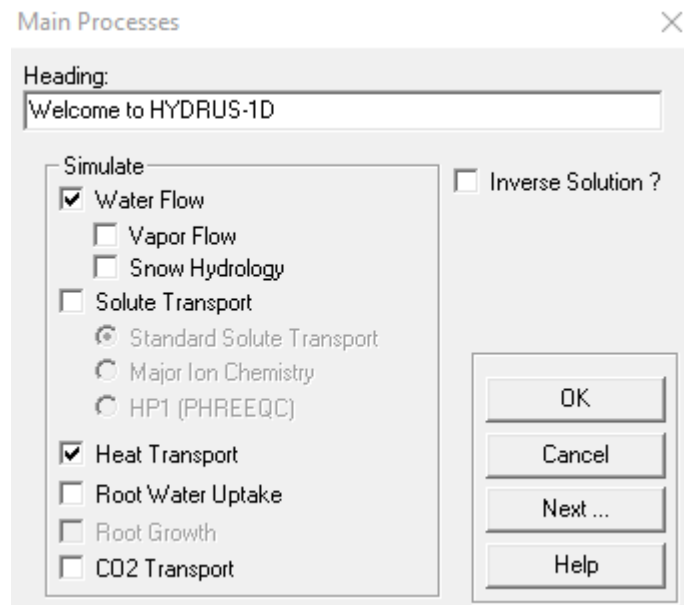
Calculations have finished successfully.

Press Enter to continue

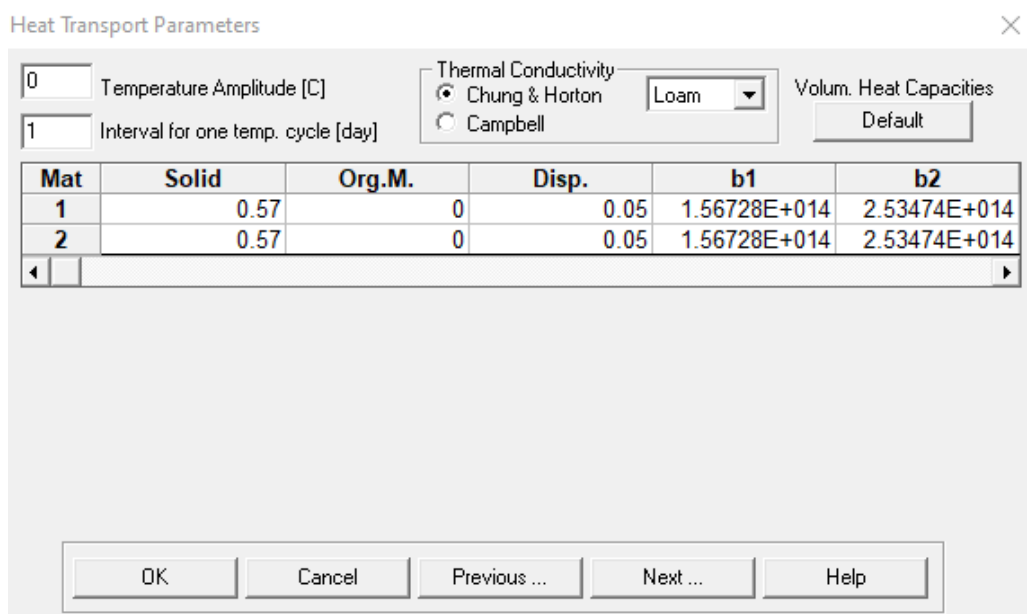
29. Press Enter

## B. Add Heat Transport to the model

1. Close the plot window
2. Go to the “Main processes” window and now add “Heat transport”



3. Select “Next” to go to the next input window
4. Go to the window Heat transport parameters
  - Select the “Chung and Horton” option and adapt the heat transport parameters if needed
  - Change the temperature amplitude to zero to neglect daily temperature variations



5. Select “Next” to go to the next input window
6. Go to the window “Heat transport boundary conditions”
  - Select temperature BC for the upper boundary condition and Zero gradient for the lower boundary condition

Heat Transport Boundary Conditions

Upper Boundary Condition

☒ Temperature BC

☐ Heat Flux BC

Lower Boundary Condition

☐ Temperature BC

☐ Heat Flux BC

☒ Zero Gradient

Snow Parameters

0.0043 Snow Melting Constant [L]

0.4 Snow Sublimation Constant [-]

0 Initial Snow Layer [L]

OK

Cancel

Previous

Next

Help

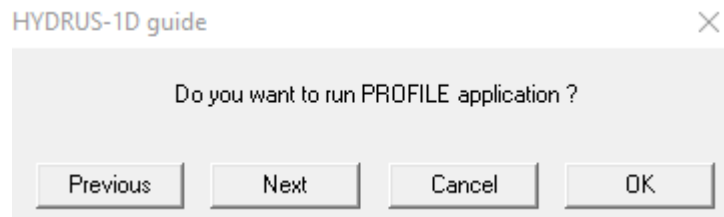
7. Select "Next" to go to the next input window
8. To the window "Time variable boundary conditions":
  - Update the temperature at the top boundary condition and keep the amplitude zero
  - The temperature at the bottom boundary is not used in case the zero gradient lower boundary condition has been selected

Time Variable Boundary Conditions

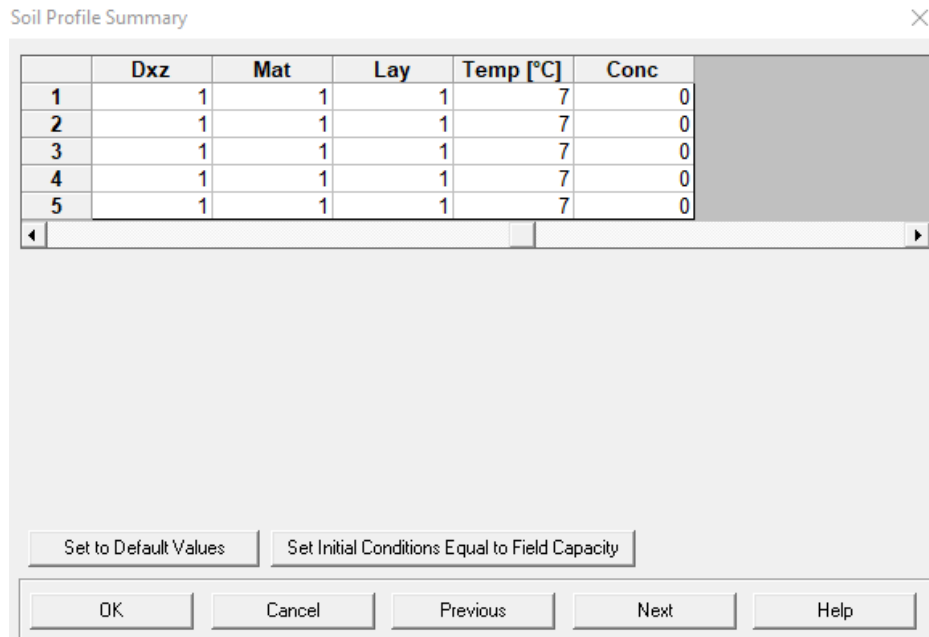
	Time [day]	Precip. [m/day]	Evap. [m/day]	hCritA [m]	tTop [°C]	tBot [°C]	Ampl [°C]
1	30.43	0.159	0.0213794	1000	0.555208	0	0
2	60.86	0.0322667	0.0116244	1000	-0.981399	0	0
3	91.29	0.11615	0.0150651	1000	3.31344	0	0
4	121.72	0.091	0.0227659	1000	7.00846	0	0
5	152.15	0.1636	0.0310064	1000	11.1235	0	0
6	182.58	0.1426	0.0567628	1000	15.0755	0	0
7	213.01	0.0837	0.0715435	1000	19.487	0	0
8	243.44	0.0506	0.0730775	1000	20.0696	0	0
9	273.87	0.120462	0.0317543	1000	11.4932	0	0
10	304.3	0.094525	0.0181268	1000	7.54911	0	0
11	334.73	0.093	0.0159618	1000	7.73968	0	0
12	365.16	0.0892	0.00648198	1000	6.40625	0	0
13	395.59	0.135325	0.00757065	1000	0.400874	0	0
14	426.02	0.179833	0.0145878	1000	2.80251	0	0

OK Cancel Previous ... Next ... Help ... Add Line Delete Line Default Time

9. Select "Next" to go to the next input window
10. Hydrus ask if you want to run Profile application: Click OK



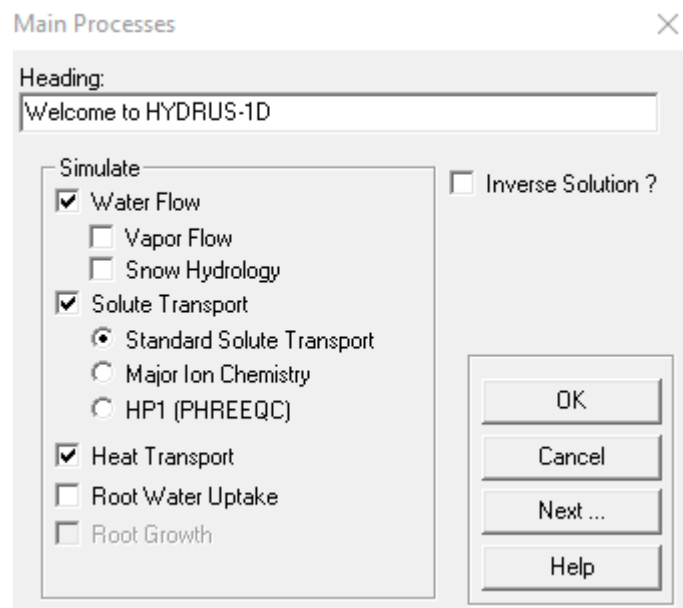
11. Go to the window "Soil profile Summary". In the last window you can update the initial temperature



12. Select "Next" to go to the next input window
13. Rerun the model and you can now also see the temperature distribution in the soil

### C. Add Solute Transport to the model

1. Close the plot window
2. Go to the “Main processes” window and now add “Solute transport” with the General Solute transport option



3. Select “Next” to go to the next input window
4. Go to “Solute transport General information”
  - Adapt the mass unit to mol
  - Leave the other entries as they are

\*\* Note that concentrations are required to be in the unit mol/L when using the other modules later on

**Solute Transport** ✕

**Time Weighting Scheme**

☐ Explicit Scheme

☒ Crank-Nicholson Scheme

☐ Implicit Scheme

**Space Weighting Scheme**

☒ Galerkin Finite Elements

☐ Upstream Weighting FE

☐ GFE with Artificial Dispersion

Mass Units:

Stability Criterion:

**Dependence on Environmental Factors**

☐ Temperature Dependence of Transport and Reaction Parameters

☐ Water Content Dependence of Transport and Reaction Parameters

**Nonequilibrium Solute Transport Models**

☒ Equilibrium Model

☐ One-site sorption model (Chemical Nonequilibrium)

☐ Two-site sorption model (Chemical Nonequilibrium)

☐ Two Kinetic Sites Model (Particle Transport Using Attachment/Detachment, Chemical Nonequilibrium)

☐ Two Kinetic Sites Model (Based on Filtration Theory, Chemical Nonequilibrium)

☐ Dual-Porosity (Mobile-Immobile Water) Model (Physical Nonequilibrium)

☐ Dual-Porosity Model with Two-Site Sorption in the Mobile Zone (Physical and Chemical Nonequilibrium)

☐ Dual-Permeability Model (Physical Nonequilibrium)

☐ Dual-Permeability Model with either Immobile Water in the Matrix or Kinetic Sorption (Physical and Chemical Nonequilibrium)

**Iteration Criteria - Only for Nonlinear Problems**

Absolute Concentration Tolerance

Relative Concentration Tolerance

Maximum Number of Iteration

**Tortuosity**

☒ Use Tortuosity Factor

☒ Millington & Quirk

☐ Moldrup

Number of Solutes:

Pulse Duration [day]:

OK

Cancel

Previous ...

Next ...

Help

5. Select "Next" to go to the next input window
6. Go to Solute Transport Parameters:
  - Adapt the bulk density
  - Adapt the diffusion coefficient of water ( $8.6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{day}$ ) and gas ( $8.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{day}$ )

**Solute Transport Parameters** ✕

**Soil Specific Parameters:**

Mat	Bulk.D.	Disp.	Frac = 1	Thlm = 0
1	1.2	0.04	1	0
2	1.2	0.04	1	0

**Solute Specific Parameters:**

Sol	Diffus. W.	Diffus. G.
1	8.6E-005	0.086

OK

Cancel

Previous ...

Next ...

Help

7. Select "Next" to go to the next input window
8. Go to Solute transport and reaction parameters:

- Leave the entries as they are

Solute Transport and Reaction Parameters - Solute 1

Mat	Kd	Nu	Beta	Henry	SinkWater1
1	0	0	1	0	0
2	0	0	1	0	0

OK Cancel Previous ... Next ... Help

9. Select "Next" to go to the next input window

10. Go to Solute transport boundary conditions

- Select for the upper boundary condition, the "stagnant BC for volatile solutes" with a stagnant boundary layer of 0.01 m and a concentration in the atmosphere of 0.01 mol/L.
- Select zero concentration gradient for the lower boundary condition
- Select in liquid phase concentration for the initial condition

Solute Transport Boundary Conditions

Upper Boundary Condition

☐ Concentration BC  
☐ Concentration Flux BC  
☒ Stagnant BC for Volatile Solutes

Stagnant Boundary Layer: 0.01

Concentr. in the Atmosphere: 0.01

Lower Boundary Condition

☐ Concentration BC  
☐ Concentration Flux BC  
☒ Zero Concentration Gradient

Initial Conditions

☒ In Liquid Phase Concentrations [Mass\_solute/Volume\_water]  
☐ In Total Concentrations [Mass\_solute/Volume\_soil]  
☐ Nonequilibrium phase is initially at equilibrium with equilibrium phase

OK Cancel Previous Next Help

11. Select "Next" to go to the next input window

12. Go to the window "Time variable boundary conditions":

- $c_{Top} = 0$

- cBot= 0

Time Variable Boundary Conditions

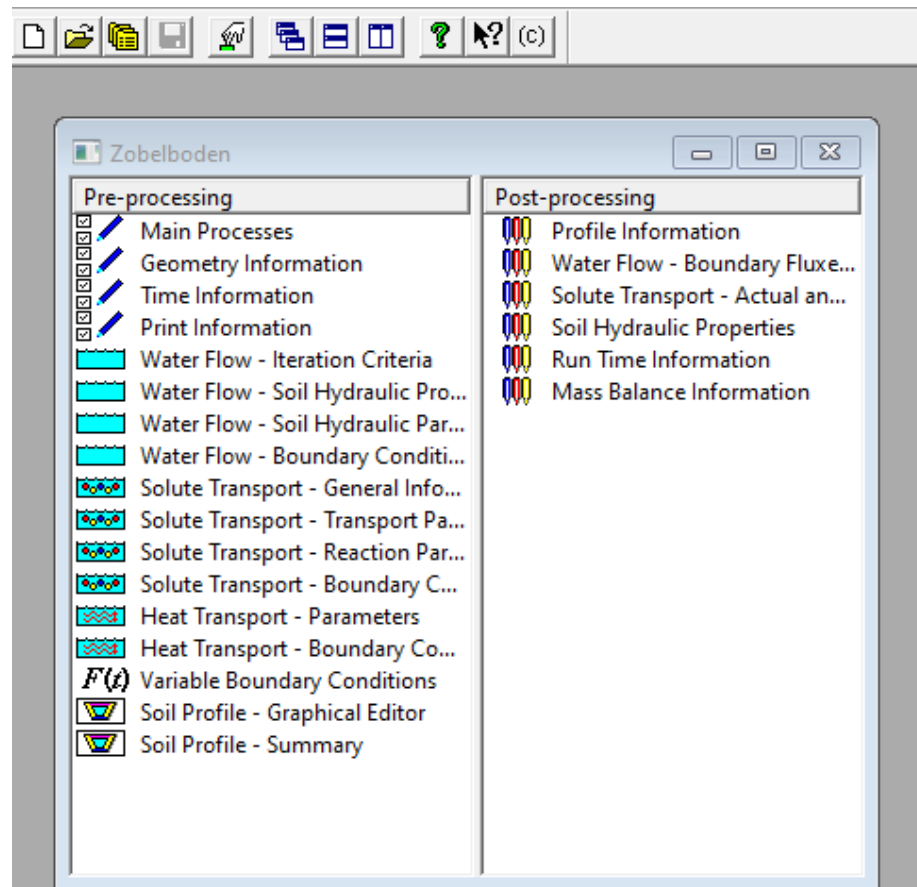
	Evap. [m/day]	hCritA [m]	tTop [°C]	tBot [°C]	Ampl [°C]	cTop	cBot
1	0.0546604	1000	0.555208	0	0	0	0
2	0.0472879	1000	-0.981399	0	0	0	0
3	0.0872857	1000	3.31344	0	0	0	0
4	0.152432	1000	7.00846	0	0	0	0
5	0.122917	1000	11.1235	0	0	0	0
6	0.168864	1000	15.0755	0	0	0	0
7	0.266065	1000	19.487	0	0	0	0
8	0.279633	1000	20.0696	0	0	0	0
9	0.122015	1000	11.4932	0	0	0	0
10	0.0844204	1000	7.54911	0	0	0	0
11	0.0966486	1000	7.73968	0	0	0	0
12	0.0597468	1000	6.40625	0	0	0	0
13	0.0344018	1000	0.400874	0	0	0	0
14	0.0563868	1000	2.80251	0	0	0	0

OK Cancel Previous ... Next ... Help ... Add Line Delete Line Default Time

13. Go to soil profile summary

- Adapt the initial concentration if needed (=0)

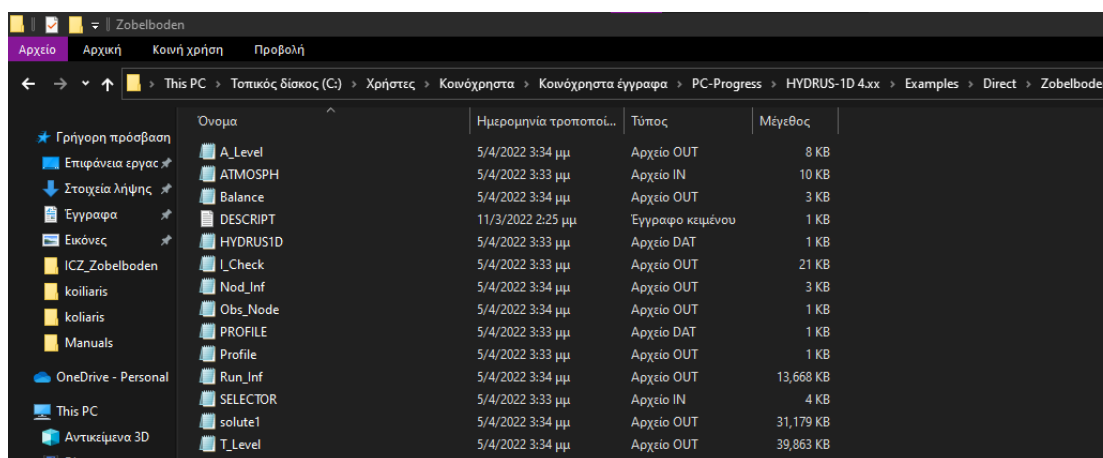
14. Rerun the model and you can now also see the solute distribution in the soil





## D. Find the outputs of the model

After running, go to Local Disk (C:), Users, Public, Public Documents, PC-Progress, Hydrus-1D 4.xx, Examples, Direct, “Zobelboden” to find the outputs



Όνομα	Ημερομηνία τροποποι...	Τύπος	Μέγεθος
A_Level	5/4/2022 3:34 μμ	Αρχείο OUT	8 KB
ATMOSPH	5/4/2022 3:33 μμ	Αρχείο IN	10 KB
Balance	5/4/2022 3:34 μμ	Αρχείο OUT	3 KB
DESCRIPT	11/3/2022 2:25 μμ	Εγγραφο κειμένου	1 KB
HYDRUS1D	5/4/2022 3:33 μμ	Αρχείο DAT	1 KB
I_Check	5/4/2022 3:33 μμ	Αρχείο OUT	21 KB
Nod_Inf	5/4/2022 3:34 μμ	Αρχείο OUT	3 KB
Obs_Node	5/4/2022 3:34 μμ	Αρχείο OUT	1 KB
PROFILE	5/4/2022 3:33 μμ	Αρχείο DAT	1 KB
Profile	5/4/2022 3:33 μμ	Αρχείο OUT	1 KB
Run_Inf	5/4/2022 3:34 μμ	Αρχείο OUT	13,668 KB
SELECTOR	5/4/2022 3:33 μμ	Αρχείο IN	4 KB
solute1	5/4/2022 3:34 μμ	Αρχείο OUT	31,179 KB
T_Level	5/4/2022 3:34 μμ	Αρχείο OUT	39,863 KB

## Excel Tool

\*\*The Excel file makes it easy to create initial condition and boundary condition concentrations that are at chemical equilibrium.

### General description

The idea is that the graphical user interface (GUI) of HYDRUS is used to prepare the HYDRUS input files for 1 single solute. SoilTrec1D uses this GUI-generated input, but switches to additional input files when information about the 45 simulated solutes is required.

### Input Sheets

1. INPUT\_RATE: In this sheet all transport properties of all 45 solutes could be adjusted, if desired.
2. INPUT\_CONC: In this sheet all initial and boundary conditions of the 45 solutes, as well as the solid and exchange phases can be assigned. This input sheet consists of 4 blocks.

### Blocks and inputs

- Block 1: three variables need to be assigned: Nsolute, Nnode and Ntime. These are the number of solutes= 45, the number of model nodes= 5 and the number of simulated time steps= 60.

- Block 2: input the initial conditions of the soil chemistry (in mol/L) for the fields in green (data for January 2015). The concentrations in the pink fields are calculated automatically and should not be adapted.
- Block 3: input the concentrations of the precipitation chemistry at the top boundary for all time varying boundary conditions in the green fields (monthly data from 2015 to 2019).
- Block 4: all concentrations must be equal to zero because the free drainage condition is chosen as the bottom boundary condition, so these values are not used.

### ***Output sheets***

1. cBot
2. CTopnew
3. selector2new
4. solidsnew
5. exchange

### ***Export of the output sheets***

The five output sheets need to be exported to .CSV format. They have to be saved with the names:

- cBot.csv
- cTop.csv
- selector\_2.csv
- solids.csv
- exchange.csv

Make sure that, in the CSV files, a period (.) is used as decimal symbol and a comma (,) is used as column separator.

## SET UP CAST MODEL

### A. CastInputParameters

1. Fill in the Total Month Simulation number with the total month number that there are available input data (=60)
2. All the input data that must be filled in:

Input data description	Type of data
Farm Yard Manure	1 value per Month
Compost	1 value per Month
Tilling	Month Value: 0 if there is no tilling or Month Value: 1 if there is tilling
NO3 deposition	1 value per Month
NH4 deposition	1 value per Month
Low molecular weight nitrogen pools deposition	1 value per Month
PO4 deposition	1 value per Month
Low molecular weight phosphorus pools deposition	1 value per Month
K deposition	1 value per Month
K fertilizer	1 value per Month
NO3 fertilization, kg/ha	1 value per Month
NH4 fertilization, kg/ha	1 value per Month
Low molecular weight nitrogen pools fertilization, kg/ha	1 value per Month
PO4 fertilization, kg/ha	1 value per Month
Low molecular weight phosphorus pools fertilization, kg/ha	1 value per Month
PO4 adsorption, kg/ha	Value (0.4-0.8)
PO4 adsorption, kg/ha: OXminbg, mg/L	Value (4-8)
Porosity	1 value per Layer
NH4_to_clay	1 value per Layer
Clay Content	1 value per Layer
ads_site_density	1 value per Layer
Bulk Density, kg/m <sup>3</sup>	1 value per Layer
Silt-Clay	1 value per Layer

### B. CastCalibrationParameters

1. Adapt "dpm\_to\_rpm\_ratio"
  - use 0.67 for shrubland and unimproved grassland
  - 0.25 for forest

After filling the 2 cast files (CastInputParameters, CastCalibrationParameters) we export them to .CSV format. The files have to be saved with the names:

- CastInputParameters.csv
- CastCalibrationParameters.csv

Make sure that, in the CSV files, a period (.) is used as decimal symbol and a comma (,) is used as column separator.

## SET UP PROSUM MODEL

### A. PROSUM\_time\_series\_inputs

All the input data that must be filled in:

Input data description	Unit	Explanation
SiteName	Text	Identifier for model run
Treatment	Text	Fertilizer or NoFertilizer
Month	integer	Month for which the values in the row apply. There must be as many rows of inputs as the model run length, as set for the stand-alone version by RunLength_Months in PROSUM_parameters.csv
Temp_C	°C	Monthly mean air temperature
PAR_uMpm2s	$\mu\text{mol PAR m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Monthly mean photosynthetically active radiation flux in daytime
CO2_uLpL	$\mu\text{L CO}_2 \text{ L}^{-1} \text{ air}$	Monthly average atmospheric CO <sub>2</sub> concentration
Herbivores_kgLivepha	kg liveweight ha <sup>-1</sup>	Stocking density for all herbivores, including domestic animals and wild vertebrates and invertebrates
Tillage_TF	0 or 1	1 = tillage event this month
Harvest_TF	0 or 1	1 = harvest event this month
PlantType	1 or 2 or 3 or 4 or 5 or 6	Predominant plant type this month: 1 = woody, deciduous, mycorrhizal; 2 = woody, deciduous, non-mycorrhizal; 3 = woody, evergreen, mycorrhizal; 4 = woody, evergreen, nonmycorrhizal; 5 = herbaceous, mycorrhizal; 6 = herbaceous, non-mycorrhizal

### B. PROSUM\_parameters

Adapt “Run Length” to the number of months you run the model (=60)

## SET UP 1D-ICZ MODEL

1. In order to run the 1D-ICZ model the above input files are necessary:

Filename	Model	Filename	Model
<b>A_LEVEL.OUT</b>	Output of HYDRUS-1D	<b>ATMOSPH.IN</b>	Output of HYDRUS-1D
<b>BALANCE.OUT</b>	Output of HYDRUS-1D	<b>DESCRIPT.TXT</b>	Output of HYDRUS-1D
<b>HYDRUS1D.DAT</b>	Output of HYDRUS-1D	<b>I_CHECK.OUT</b>	Output of HYDRUS-1D
<b>NOD_INF.OUT</b>	Output of HYDRUS-1D	<b>OBS_NODE.OUT</b>	Output of HYDRUS-1D
<b>PROFILE.DAT</b>	Output of HYDRUS-1D	<b>PROFILE.OUT</b>	Output of HYDRUS-1D
<b>RUN_INF.OUT</b>	Output of HYDRUS-1D	<b>SELECTOR.IN</b>	Output of HYDRUS-1D
<b>solute1.OUT</b>	Output of HYDRUS-1D	<b>T_LEVEL.OUT</b>	Output of HYDRUS-1D
<b>cBot.csv</b>	Output of Excel Tool	<b>cTop.csv</b>	Output of Excel Tool
<b>selector_2.csv</b>	Output of Excel Tool	<b>solids.csv</b>	Output of Excel Tool
<b>exchange.csv</b>	Output of Excel Tool	<b>LEVEL_01.DIR</b>	HYDRUS-1D
<b>weathering.dat</b>	SAFE weathering	<b>wateravailability.dat</b>	
<b>CastInputParameters.csv</b>	Input of CAST	<b>CastCalibrationParameters.csv</b>	Input of CAST
<b>PROSUM_time_series_inputs.csv</b>	Input of PROSUM	<b>PROSUM_parameters.csv</b>	Input of PROSUM
<b>PROSUM_parameters_by_plant_bit.csv</b>	Input of PROSUM	<b>PROSUM_parameters_by_plant_type.csv</b>	Input of PROSUM
<b>PROSUM_parameters_by_nutrient_element.csv</b>	Input of PROSUM	<b>kinetics.dat</b>	Kinetic module
<b>bioturbate.dat</b>	Bioturbation		

2. Create a folder called ICZ\_Run\_Model and within that folder add a new folder called "koiliaris" and add the above 14 files:

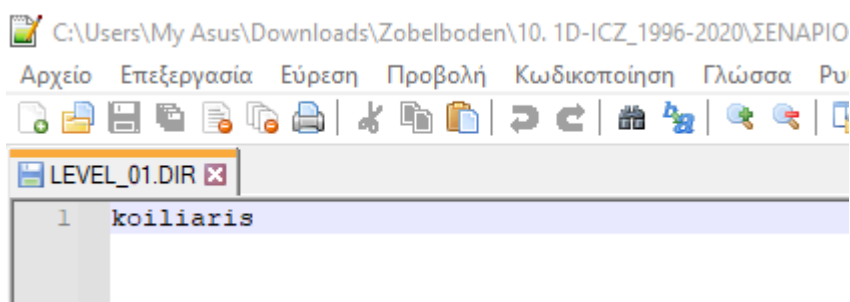
1	A_LEVEL.OUT	8	OBS_NODE.OUT
2	ATMOSP.IN	9	PROFILE.DAT
3	BALANCE.OUT	10	PROFILE.OUT
4	DESCRIPT.TXT	11	RUN_INF.OUT
5	HYDRUS1D.DAT	12	SELECTOR.IN
6	I_CHECK.OUT	13	SOLUTE1.OUT
7	NOD_INF.OUT	14	T_LEVEL.OUT

3. To the folder called ICZ\_Run\_Model add the above 16 files:

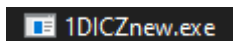
1	bioturbate.dat	9	PROSUM_parameters_by_nutrient_element.csv
2	CastCalibrationParameters.csv	10	PROSUM_parameters_by_plant_bit.csv
3	CastInputParameters.csv	11	PROSUM_parameters_by_plant_type.csv
4	cBot.csv	12	PROSUM_time_series_inputs.csv
5	cTop.csv	13	selector_2.csv
6	exchange.csv	14	solids.csv
7	kinetics.dat	15	wateravailability.dat
8	PROSUM_parameters.csv	16	weathering.dat

4. To the folder called ICZ\_Run\_Model, a file with the name "LEVEL\_01.DIR" is required. This file should contain the name of the Hydrus-1D directory where the files SELECTOR.IN, PROFILE.IN and ATMOSP.IN are in. So, by clicking this file, edit it with Notepad++ by writing "koiliaris" in the first row.

\*\*With the option "pedo" (2<sup>nd</sup> row) each model layer is given the soil hydraulic parameters based on the pedotransfer functions.



5. To the folder called ICZ\_Run\_Model add the "1DICZnew.exe"



## RUN 1D-ICZ MODEL

1. To run the 1D-ICZ model double click the “1DICZnew.exe”

```

C:\Users\My Asus\Downloads\Zobelboden\ICZ_Run_Models\ICZ_Zobelboden_16\1DICZnew.exe

HYDRUS
Code for simulating one-dimensional variably
saturated water flow, heat transport, and
transport of solutes involved in sequential
first-order decay reactions

version 4.08

Last modified: January, 2009

-----

Welcome to HYDRUS-1D

reading nodal information
reading material information
generating materials
reading time information
reading heat transport information
reading solute transport information
printing profile information
beginning of numerical solution
end chemistryinitialize
total_month_num      60

Time ItW  ItCum  vTop   SvTop   SvRoot   SvBot   hTop hRoot hBot
0.0010  2      2-0.58E-04-0.58E-20  0.00E+00-0.58E-20  -1.78  0.00-1.78





























```

2. After the model is done running, several files have been created for further analysis
3. To the file “ICZ\_Run\_Model” these files include:

Cast_Bio_(tC-ha).dat	Cast_Carbon_(tC-ha).dat
Cast_Fauna_(tC-ha).dat	Cast_Mass_(t-ha).dat
Cast_Nitrogen_(tN-ha).dat	Cast_Phosphorus_(tP-ha).dat
Cast_Porosity_BulkDensity.dat	cast_production_dissolve.dat
Cast_Total_CO2_Production.dat	Cast_WSA_(%).dat
cexchangeSO.dat	cexchangeSOH.dat
cexchangeSOH2.dat	cexchangeSOH2SO4.dat
cexchangeX2-Ca.dat	cexchangeX2-Mg.dat
cexchangeX3-Al.dat	cexchangeX-K.dat
cexchangeX-Na.dat	concentrationA.dat
concentrationAl.dat	concentrationAIA.dat
concentrationAlF.dat	concentrationAlF2.dat
concentrationAlF3.dat	concentrationAlF4.dat
concentrationAlF5.dat	concentrationAlH3SiO4.dat
concentrationAlHA.dat	concentrationAlOH.dat
concentrationAlOH2.dat	concentrationAlOH3.dat
concentrationAlOH4.dat	concentrationAlSO4.dat
concentrationAlSO42.dat	concentrationBIO.dat

concentrationBIO_N.dat	concentrationBIO_P.dat
concentrationCa.dat	concentrationCO3.dat
concentrationF.dat	concentrationH.dat
concentrationH2A.dat	concentrationH2CO3.dat
concentrationH2SiO4.dat	concentrationH3A.dat
concentrationH3SiO4.dat	concentrationH4SiO4.dat
concentrationHA.dat	concentrationHCO3.dat
concentrationHUM_N.dat	concentrationHUM_P.dat
concentrationK.dat	concentrationLMWN.dat
concentrationLMWP.dat	concentrationMg.dat
concentrationNa.dat	concentrationNH3.dat
concentrationNH4+.dat	concentrationNO3.dat
concentrationOH.dat	concentrationOxalate.dat
concentrationPO4.dat	concentrationSO4.dat
csolidAl(OH)3.dat	csolidCaCO3.dat
csolidCaSO4.dat	HconsumptionPROSUM.dat
Hconsumptionweathering.dat	HproductionCAST.dat
mass_balance_Mg.dat	NH3topflux.dat
Pedotransfer.dat	PROSUM_outputs.csv
temp.dat	watercontent.dat
wateruptake.dat	

4. To the file “koiliaris” there have been created output files for the 45 solutes (solute1.out, solute2.out ... solute45.out)

 solute1.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute2.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute3.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute4.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute5.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute6.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute7.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute8.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute9.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute10.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute11.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute12.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute13.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute14.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute15.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute16.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute17.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute18.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute19.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute20.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute21.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute22.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute23.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute24.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute25.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute26.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute27.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB
 solute28.out	23/4/2022 7:24 μμ	Αρχείο OUT	10 KB



Παράρτημα II: Πίνακες δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τις αρχικοποιήσεις των μοντέλων HYDRUS-1D και PROSUM (60 μηνών, 300 μηνών)

Πίνακας Π2.1. Οριακές συνθήκες θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής 60 μηνών (HYDRUS-1D)

Μήνες	Θερμοκρασία (°C)	Βροχόπτωση (m month <sup>-1</sup> )	Εξατμισοδιαπνοή ET (m month <sup>-1</sup> )
1	0.555	0.159	0.021
2	-0.981	0.032	0.012
3	3.313	0.116	0.015
4	7.008	0.091	0.023
5	11.124	0.164	0.031
6	15.076	0.143	0.057
7	19.487	0.084	0.072
8	20.070	0.051	0.073
9	11.493	0.120	0.032
10	7.549	0.095	0.018
11	7.740	0.093	0.016
12	6.406	0.089	0.006
13	0.401	0.135	0.008
14	2.803	0.180	0.015
15	2.142	0.091	0.017
16	7.563	0.090	0.031
17	10.799	0.239	0.030
18	15.043	0.152	0.039
19	17.301	0.261	0.047
20	16.455	0.182	0.042
21	15.671	0.199	0.034
22	6.997	0.203	0.011
23	3.288	0.102	0.008
24	2.109	0.110	0.009
25	-3.358	0.094	0.007
26	2.851	0.105	0.007
27	5.658	0.203	0.014
28	5.296	0.250	0.016
29	12.734	0.183	0.040
30	17.674	0.081	0.061
31	17.235	0.278	0.064
32	18.406	0.230	0.065
33	10.820	0.164	0.022
34	10.163	0.274	0.025
35	3.357	0.170	0.011
36	0.300	0.193	0.012
37	2.510	0.220	0.012
38	-5.002	0.057	0.004
39	1.073	0.082	0.008
40	13.261	0.049	0.047
41	14.487	0.052	0.042
42	15.627	0.267	0.039
43	18.244	0.064	0.061
44	19.848	0.079	0.069

45	14.838	0.110	0.019
46	11.249	0.072	0.032
47	5.429	0.045	0.014
48	1.328	0.339	0.007
49	-2.753	0.290	0.004
50	3.804	0.084	0.019
51	5.194	0.117	0.019
52	8.393	0.088	0.025
53	8.212	0.290	0.033
54	20.087	0.062	0.061
55	18.515	0.133	0.052
56	18.380	0.089	0.060
57	13.461	0.114	0.025
58	11.963	0.133	0.030
59	5.925	0.086	0.013
60	3.475	0.148	0.011

Πίνακας Π2.2. Οριακές συνθήκες θερμοκρασίας, βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής 300 μηνών (HYDRUS-1D)

Μήνες	Θερμοκρασία (°C)	Βροχόπτωση (m month <sup>-1</sup> )	Εξατμισοδιαπνοή ET (m month <sup>-1</sup> )
1	-2.878	0.032	0.008
2	-2.659	0.041	0.009
3	-1.424	0.083	0.010
4	6.153	0.123	0.025
5	11.228	0.265	0.031
6	15.184	0.125	0.042
7	14.499	0.146	0.042
8	14.475	0.179	0.031
9	8.816	0.352	0.017
10	8.881	0.245	0.026
11	5.211	0.135	0.019
12	-3.246	0.043	0.008
13	-1.262	0.005	0.011
14	2.994	0.123	0.018
15	3.493	0.248	0.014
16	3.032	0.160	0.019
17	11.858	0.166	0.044
18	14.711	0.113	0.046
19	14.543	0.309	0.036
20	16.596	0.123	0.050
21	13.484	0.039	0.038
22	6.382	0.167	0.022
23	3.650	0.096	0.016
24	1.838	0.115	0.009
25	1.693	0.061	0.017
26	4.672	0.026	0.022
27	1.436	0.299	0.017
28	7.426	0.082	0.027
29	11.936	0.125	0.045

30	15.355	0.149	0.047
31	15.721	0.075	0.043
32	16.330	0.133	0.052
33	12.281	0.281	0.029
34	8.446	0.175	0.020
35	0.499	0.132	0.008
36	0.079	0.119	0.013
37	2.223	0.096	0.020
38	-2.866	0.242	0.006
39	3.279	0.105	0.018
40	6.703	0.110	0.023
41	12.475	0.116	0.039
42	13.391	0.145	0.038
43	16.613	0.191	0.054
44	15.438	0.146	0.042
45	15.443	0.073	0.040
46	9.142	0.044	0.027
47	1.161	0.065	0.012
48	0.485	0.133	0.013
49	-2.297	0.171	0.008
50	2.195	0.165	0.014
51	2.415	0.248	0.014
52	9.525	0.057	0.039
53	13.339	0.165	0.050
54	16.261	0.060	0.063
55	13.590	0.155	0.039
56	17.664	0.121	0.062
57	12.928	0.188	0.030
58	11.452	0.105	0.035
59	5.859	0.057	0.021
60	2.886	0.081	0.016
61	-0.435	0.032	0.011
62	1.492	0.027	0.015
63	4.517	0.143	0.015
64	5.015	0.137	0.024
65	13.652	0.079	0.047
66	12.116	0.204	0.032
67	16.254	0.158	0.049
68	17.136	0.175	0.046
69	9.125	0.287	0.015
70	12.862	0.045	0.033
71	0.439	0.115	0.007
72	-3.682	0.184	0.005
73	0.539	0.096	0.016
74	4.136	0.095	0.015
75	4.831	0.209	0.024
76	5.842	0.113	0.021
77	13.154	0.019	0.043
78	16.733	0.247	0.057
79	16.365	0.130	0.048
80	16.079	0.407	0.035
81	10.460	0.167	0.024
82	7.444	0.202	0.018

83	6.268	0.168	0.016
84	0.150	0.168	0.006
85	-2.054	0.139	0.007
86	-3.296	0.026	0.011
87	3.932	0.075	0.022
88	6.184	0.062	0.029
89	13.573	0.130	0.043
90	18.578	0.135	0.060
91	16.888	0.173	0.053
92	20.277	0.066	0.077
93	12.763	0.085	0.037
94	4.631	0.013	0.015
95	6.141	0.013	0.018
96	1.872	0.066	0.015
97	-2.619	0.142	0.007
98	0.576	0.115	0.013
99	1.704	0.112	0.020
100	7.336	0.044	0.028
101	9.189	0.211	0.029
102	13.316	0.172	0.038
103	15.428	0.211	0.041
104	16.693	0.191	0.047
105	12.399	0.199	0.029
106	10.915	0.072	0.026
107	2.980	0.108	0.010
108	0.438	0.016	0.012
109	-0.484	0.103	0.010
110	-3.626	0.173	0.006
111	1.158	0.406	0.015
112	7.145	0.159	0.026
113	11.826	0.244	0.039
114	14.759	0.141	0.045
115	15.897	0.309	0.047
116	13.760	0.227	0.029
117	13.241	0.158	0.030
118	10.386	0.023	0.030
119	2.027	0.027	0.011
120	-2.296	0.115	0.005
121	-1.777	0.265	0.011
122	-2.305	0.091	0.008
123	0.006	0.204	0.015
124	6.771	0.143	0.024
125	10.866	0.242	0.035
126	14.084	0.277	0.043
127	19.475	0.079	0.073
128	12.882	0.405	0.029
129	15.475	0.066	0.039
130	12.288	0.079	0.036
131	6.145	0.147	0.019
132	3.680	0.041	0.019
133	3.079	0.165	0.013
134	3.149	0.117	0.014
135	4.224	0.078	0.021

136	10.723	0.015	0.045
137	12.676	0.253	0.046
138	16.029	0.156	0.053
139	16.645	0.168	0.057
140	15.721	0.096	0.045
141	10.485	0.418	0.024
142	6.951	0.111	0.019
143	1.281	0.131	0.010
144	0.511	0.113	0.012
145	2.907	0.111	0.016
146	2.912	0.032	0.019
147	1.859	0.201	0.016
148	6.277	0.106	0.024
149	12.884	0.071	0.053
150	15.527	0.225	0.045
151	15.584	0.279	0.043
152	16.150	0.151	0.046
153	10.486	0.123	0.029
154	9.393	0.076	0.027
155	4.879	0.114	0.020
156	0.625	0.141	0.011
157	-2.424	0.044	0.011
158	-1.384	0.261	0.009
159	1.224	0.188	0.011
160	11.367	0.037	0.052
161	12.154	0.213	0.038
162	13.071	0.348	0.032
163	16.825	0.155	0.056
164	17.365	0.226	0.050
165	13.958	0.136	0.030
166	6.935	0.108	0.020
167	7.135	0.077	0.025
168	-0.391	0.083	0.011
169	-5.049	0.045	0.004
170	-1.338	0.065	0.012
171	2.322	0.058	0.022
172	6.969	0.073	0.032
173	9.348	0.172	0.021
174	14.498	0.242	0.047
175	17.746	0.245	0.064
176	15.551	0.242	0.045
177	10.635	0.072	0.027
178	6.848	0.053	0.024
179	4.674	0.042	0.017
180	-2.086	0.053	0.010
181	-0.461	0.160	0.010
182	-0.642	0.038	0.012
183	4.279	0.064	0.026
184	9.718	0.055	0.039
185	12.255	0.105	0.049
186	14.454	0.115	0.044
187	14.164	0.192	0.041
188	17.740	0.097	0.068

189	14.900	0.113	0.052
190	8.189	0.209	0.029
191	6.041	0.003	0.030
192	1.708	0.137	0.013
193	-0.836	0.279	0.008
194	-6.169	0.166	0.005
195	5.643	0.092	0.026
196	7.307	0.081	0.041
197	12.476	0.128	0.052
198	15.529	0.224	0.053
199	16.301	0.250	0.046
200	17.489	0.131	0.066
201	13.008	0.175	0.037
202	8.280	0.101	0.031
203	5.752	0.058	0.023
204	0.486	0.169	0.013
205	-1.666	0.345	0.006
206	-3.811	0.137	0.003
207	-0.157	0.087	0.016
208	7.384	0.049	0.030
209	9.776	0.325	0.029
210	13.623	0.329	0.048
211	18.299	0.057	0.086
212	17.194	0.156	0.074
213	11.339	0.181	0.027
214	10.041	0.075	0.031
215	2.796	0.167	0.013
216	3.523	0.040	0.021
217	3.348	0.076	0.018
218	3.859	0.039	0.021
219	6.339	0.070	0.034
220	8.451	0.108	0.033
221	9.968	0.425	0.036
222	15.031	0.077	0.094
223	16.745	0.173	0.071
224	14.298	0.193	0.057
225	12.825	0.237	0.036
226	10.736	0.172	0.025
227	6.939	0.031	0.016
228	1.437	0.117	0.016
229	0.555	0.159	0.021
230	-0.981	0.032	0.012
231	3.313	0.116	0.015
232	7.008	0.091	0.023
233	11.124	0.164	0.031
234	15.076	0.143	0.057
235	19.487	0.084	0.072
236	20.070	0.051	0.073
237	11.493	0.120	0.032
238	7.549	0.095	0.018
239	7.740	0.093	0.016
240	6.406	0.089	0.006
241	0.401	0.135	0.008

242	2.803	0.180	0.015
243	2.142	0.091	0.017
244	7.563	0.090	0.031
245	10.799	0.239	0.030
246	15.043	0.152	0.039
247	17.301	0.261	0.047
248	16.455	0.182	0.042
249	15.671	0.199	0.034
250	6.997	0.203	0.011
251	3.288	0.102	0.008
252	2.109	0.110	0.009
253	-3.358	0.094	0.007
254	2.851	0.105	0.007
255	5.658	0.203	0.014
256	5.296	0.250	0.016
257	12.734	0.183	0.040
258	17.674	0.081	0.061
259	17.235	0.278	0.064
260	18.406	0.230	0.065
261	10.820	0.164	0.022
262	10.163	0.274	0.025
263	3.357	0.170	0.011
264	0.300	0.193	0.012
265	2.510	0.220	0.012
266	-5.002	0.057	0.004
267	1.073	0.082	0.008
268	13.261	0.049	0.047
269	14.487	0.052	0.042
270	15.627	0.267	0.039
271	18.244	0.064	0.061
272	19.848	0.079	0.069
273	14.838	0.110	0.019
274	11.249	0.072	0.032
275	5.429	0.045	0.014
276	1.328	0.339	0.007
277	-2.753	0.290	0.004
278	3.804	0.084	0.019
279	5.194	0.117	0.019
280	8.393	0.088	0.025
281	8.212	0.290	0.033
282	20.087	0.062	0.061
283	18.515	0.133	0.052
284	18.380	0.089	0.060
285	13.461	0.114	0.025
286	11.963	0.133	0.030
287	5.925	0.086	0.013
288	3.475	0.148	0.011
289	3.021	0.089	0.012
290	3.765	0.276	0.015
291	3.565	0.069	0.018
292	10.354	0.022	0.042
293	9.850	0.117	0.036
294	14.443	0.191	0.045

<b>295</b>	17.307	0.133	0.049
<b>296</b>	17.858	0.253	0.050
<b>297</b>	13.825	0.200	0.032
<b>298</b>	8.514	0.196	0.016
<b>299</b>	5.995	0.043	0.015
<b>300</b>	2.502	0.112	0.010

Πίνακας Π2.3. Μέση θερμοκρασία και φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία 60 μηνών (PROSUM)

<b>Μήνες</b>	<b>Μέση θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία – PAR (<math>\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}</math>)</b>
<b>1</b>	0.555	103.25
<b>2</b>	-0.981	199.13
<b>3</b>	3.313	282.75
<b>4</b>	7.008	315.25
<b>5</b>	11.124	410.61
<b>6</b>	15.076	516.07
<b>7</b>	19.487	643.22
<b>8</b>	20.070	621.51
<b>9</b>	11.493	327.08
<b>10</b>	7.549	234.77
<b>11</b>	7.740	171.91
<b>12</b>	6.406	141.36
<b>13</b>	0.401	104.82
<b>14</b>	2.803	178.90
<b>15</b>	2.142	267.72
<b>16</b>	7.563	407.76
<b>17</b>	10.799	458.41
<b>18</b>	15.043	485.57
<b>19</b>	17.301	498.43
<b>20</b>	16.455	454.54
<b>21</b>	15.671	420.01
<b>22</b>	6.997	200.18
<b>23</b>	3.288	113.52
<b>24</b>	2.109	129.18
<b>25</b>	-3.358	133.27
<b>26</b>	2.851	236.33
<b>27</b>	5.658	306.75
<b>28</b>	5.296	320.85
<b>29</b>	12.734	547.66
<b>30</b>	17.674	591.90
<b>31</b>	17.235	564.56
<b>32</b>	18.406	532.93
<b>33</b>	10.820	289.05
<b>34</b>	10.163	239.90
<b>35</b>	3.357	126.30
<b>36</b>	0.300	66.15
<b>37</b>	2.510	99.61
<b>38</b>	-5.002	128.51
<b>39</b>	1.073	264.96
<b>40</b>	13.261	562.90



41	14.487	518.73
42	15.627	446.65
43	18.244	572.35
44	19.848	545.11
45	14.838	407.91
46	11.249	300.02
47	5.429	174.74
48	1.328	54.66
49	-2.753	75.30
50	3.804	252.78
51	5.194	291.57
52	8.393	420.14
53	8.212	518.73
54	20.087	639.81
55	18.515	541.83
56	18.380	456.55
57	13.461	354.04
58	11.963	286.35
59	5.925	157.66
60	3.475	75.40

Πίνακας Π2.4. Μέση θερμοκρασία και φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία 300 μηνών (PROSUM)

Μήνες	Μέση θερμοκρασία (°C)	Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία – PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
1	-2.878	34.728
2	-2.659	177.384
3	-1.424	153.836
4	6.153	278.729
5	11.228	348.785
6	15.184	409.006
7	14.499	298.152
8	14.475	338.346
9	8.816	149.348
10	8.881	80.690
11	5.211	49.285
12	-3.246	35.322
13	-1.262	34.728
14	2.994	177.384
15	3.493	153.836
16	3.032	278.729
17	11.858	348.785
18	14.711	409.006
19	14.543	298.152
20	16.596	338.346
21	13.484	97.894
22	6.382	55.752
23	3.650	36.869
24	1.838	19.753

25	1.693	34.728
26	4.672	177.384
27	1.436	153.836
28	7.426	278.729
29	11.936	348.785
30	15.355	409.006
31	15.721	298.152
32	16.330	338.346
33	12.281	200.801
34	8.446	105.629
35	0.499	61.701
36	0.079	50.892
37	2.223	79.588
38	-2.866	73.254
39	3.279	177.833
40	6.703	268.174
41	12.475	365.127
42	13.391	363.732
43	16.613	378.832
44	15.438	299.633
45	15.443	249.897
46	9.142	144.645
47	1.161	62.802
48	0.485	42.390
49	-2.297	69.310
50	2.195	96.091
51	2.415	151.711
52	9.525	308.352
53	13.339	394.589
54	16.261	469.165
55	13.590	331.913
56	17.664	367.381
57	12.928	225.237
58	11.452	139.016
59	5.859	78.971
60	2.886	59.030
61	-0.435	63.481
62	1.492	108.350
63	4.517	165.407
64	5.015	256.015
65	13.652	396.016
66	12.116	340.019
67	16.254	378.862
68	17.136	340.687
69	9.125	143.376
70	12.862	167.534
71	0.439	55.742
72	-3.682	39.531
73	0.539	69.523
74	4.136	91.753
75	4.831	208.017
76	5.842	256.353
77	13.154	335.764

78	16.733	446.924
79	16.365	408.487
80	16.079	279.021
81	10.460	206.201
82	7.444	126.142
83	6.268	56.559
84	0.150	41.126
85	-2.054	42.551
86	-3.296	150.988
87	3.932	195.992
88	6.184	299.535
89	13.573	377.769
90	18.578	457.441
91	16.888	406.850
92	20.277	403.265
93	12.763	262.073
94	4.631	133.839
95	6.141	90.626
96	1.872	57.767
97	-2.619	56.383
98	0.576	96.285
99	1.704	193.553
100	7.336	295.657
101	9.189	319.919
102	13.316	363.411
103	15.428	354.392
104	16.693	342.699
105	12.399	243.717
106	10.915	154.004
107	2.980	84.549
108	0.438	45.781
109	-0.484	70.867
110	-3.626	96.647
111	1.158	214.388
112	7.145	291.602
113	11.826	395.858
114	14.759	401.843
115	15.897	378.836
116	13.760	270.908
117	13.241	249.245
118	10.386	185.627
119	2.027	68.266
120	-2.296	33.794
121	-1.777	85.352
122	-2.305	97.010
123	0.006	150.558
124	6.771	247.516
125	10.866	334.763
126	14.084	414.176
127	19.475	491.635
128	12.882	259.772
129	15.475	296.825
130	12.288	184.056

131	6.145	79.240
132	3.680	60.792
133	3.079	42.016
134	3.149	114.811
135	4.224	205.300
136	10.723	419.568
137	12.676	413.999
138	16.029	599.610
139	16.645	565.484
140	15.721	531.565
141	10.485	383.179
142	6.951	267.945
143	1.281	111.423
144	0.511	112.140
145	2.907	156.930
146	2.912	319.102
147	1.859	303.899
148	6.277	446.494
149	12.884	618.702
150	15.527	566.948
151	15.584	536.008
152	16.150	573.264
153	10.486	391.188
154	9.393	308.708
155	4.879	179.890
156	0.625	104.224
157	-2.424	142.133
158	-1.384	170.961
159	1.224	224.826
160	11.367	661.707
161	12.154	556.303
162	13.071	463.950
163	16.825	632.153
164	17.365	584.412
165	13.958	464.152
166	6.935	248.629
167	7.135	183.988
168	-0.391	98.910
169	-5.049	86.067
170	-1.338	207.510
171	2.322	382.776
172	6.969	524.191
173	9.348	350.971
174	14.498	521.598
175	17.746	670.518
176	15.551	504.711
177	10.635	408.203
178	6.848	283.127
179	4.674	178.187
180	-2.086	108.768
181	-0.461	123.745
182	-0.642	239.887
183	4.279	413.162

184	9.718	581.915
185	12.255	608.091
186	14.454	520.907
187	14.164	499.390
188	17.740	563.490
189	14.900	463.425
190	8.189	331.521
191	6.041	250.748
192	1.708	105.734
193	-0.836	103.118
194	-6.169	155.268
195	5.643	453.609
196	7.307	519.276
197	12.476	616.192
198	15.529	606.232
199	16.301	491.266
200	17.489	626.246
201	13.008	398.802
202	8.280	295.758
203	5.752	181.523
204	0.486	83.892
205	-1.666	74.624
206	-3.811	122.988
207	-0.157	369.338
208	7.384	463.611
209	9.776	466.427
210	13.623	557.539
211	18.299	751.211
212	17.194	645.414
213	11.339	369.015
214	10.041	333.149
215	2.796	137.372
216	3.523	168.823
217	3.348	135.220
218	3.859	307.109
219	6.339	480.848
220	8.451	416.135
221	9.968	458.748
222	15.031	668.360
223	16.745	581.887
224	14.298	441.819
225	12.825	343.189
226	10.736	331.623
227	6.939	271.105
228	1.437	155.092
229	0.555	103.249
230	-0.981	199.131
231	3.313	282.751
232	7.008	315.253
233	11.124	410.605
234	15.076	516.073
235	19.487	643.220
236	20.070	621.508

237	11.493	327.084
238	7.549	234.769
239	7.740	171.909
240	6.406	141.362
241	0.401	104.818
242	2.803	178.898
243	2.142	267.723
244	7.563	407.762
245	10.799	458.406
246	15.043	485.569
247	17.301	498.431
248	16.455	454.542
249	15.671	420.009
250	6.997	200.176
251	3.288	113.516
252	2.109	129.179
253	-3.358	133.272
254	2.851	236.330
255	5.658	306.749
256	5.296	320.847
257	12.734	547.663
258	17.674	591.901
259	17.235	564.560
260	18.406	532.925
261	10.820	289.050
262	10.163	239.905
263	3.357	126.298
264	0.300	66.153
265	2.510	99.606
266	-5.002	128.509
267	1.073	264.962
268	13.261	562.898
269	14.487	518.730
270	15.627	446.647
271	18.244	572.346
272	19.848	545.114
273	14.838	407.912
274	11.249	300.022
275	5.429	174.736
276	1.328	54.663
277	-2.753	75.299
278	3.804	252.784
279	5.194	291.571
280	8.393	420.143
281	8.212	518.730
282	20.087	639.808
283	18.515	541.828
284	18.380	456.551
285	13.461	354.043
286	11.963	286.346
287	5.925	157.665
288	3.475	75.398
289	3.021	137.268

<b>290</b>	3.765	189.116
<b>291</b>	3.565	311.421
<b>292</b>	10.354	554.863
<b>293</b>	9.850	380.636
<b>294</b>	14.443	411.459
<b>295</b>	17.307	509.265
<b>296</b>	17.858	500.833
<b>297</b>	13.825	380.977
<b>298</b>	8.514	293.184
<b>299</b>	5.995	166.201
<b>300</b>	2.502	65.031

### Παράρτημα III: Εγχειρίδιο χρήσης λογισμικού DrinC για τον υπολογισμό του δείκτη ξηρασίας RDI

Το λογισμικό DrinC (Drought Indices Calculator) είναι ένα εργαλείο εκτίμησης διαφόρων δεικτών ξηρασίας. Ειδικότερα το DrinC υπολογίζει:

- SPI, Standardized Precipitation Index
- aSPI, Agricultural Standardized Precipitation Index
- RDI, Reconnaissance Drought Index
- eRDI, Effective Reconnaissance Drought Index
- SDI, Streamflow Drought Index
- PD, Precipitation Deciles

#### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΗ RDI

Για 25 έτη (1996-2020), δηλαδή 25·12 μήνες= 300 μήνες

##### A. Εισαγωγή δεδομένων σε αρχεία Excel (.xlsx)

Ο δείκτης ξηρασίας RDI κάνει χρήση μετρήσεων βροχόπτωσης (mm) και εξατμισοδιαπνοής (mm) μηνιαίας χρονοσειράς για κάθε υδρολογικό έτος. Στις μεσογειακές χώρες κάθε υδρολογικό έτος αρχίζει από τον μήνα Οκτώβρη και τελειώνει τον μήνα Σεπτέμβρη.

1. Το αρχείο Excel των μετρήσεων της βροχόπτωσης (precipitation) θα είναι της μορφής:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Year	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
1996-97	0.2448	0.13484	0.0426	0.0048	0.12263	0.2478	0.16	0.1663	0.11297	0.30935	0.12308	0.03895
1997-98	0.1674	0.09605	0.11468	0.06094	0.0256	0.2988	0.082	0.12495	0.14932	0.07525	0.1328	0.2811
1998-99	0.17528	0.13206	0.1186	0.0962	0.24166	0.1045	0.1103	0.1155	0.14499	0.19058	0.1461	0.07293
1999-00	0.0435	0.06537	0.13265	0.17076	0.1652	0.2477	0.0571	0.1652	0.0604	0.15458	0.12083	0.1884
2000-01	0.1045	0.0574	0.0807	0.0323	0.0265	0.1427	0.13688	0.07949	0.2044	0.1579	0.1754	0.28728
2001-02	0.0449	0.1154	0.18443	0.0956	0.09478	0.20873	0.1133	0.0186	0.24655	0.13045	0.40675	0.16711
2002-03	0.20238	0.16764	0.16795	0.1386	0.0263	0.0745	0.06238	0.1296	0.1347	0.17258	0.0661	0.0851
2003-04	0.01273	0.01326	0.06621	0.14194	0.11505	0.11207	0.0442	0.2111	0.17213	0.2106	0.1908	0.19853
2004-05	0.0723	0.1081	0.0157	0.1033	0.17253	0.4063	0.1585	0.24358	0.14055	0.30873	0.22675	0.15767
2005-06	0.0229	0.02663	0.1152	0.26488	0.09066	0.20395	0.14284	0.24166	0.27672	0.07903	0.405	0.0664
2006-07	0.0788	0.14726	0.0407	0.16483	0.1171	0.0775	0.0151	0.2527	0.15637	0.16831	0.09571	0.4181
2007-08	0.11125	0.1305	0.11301	0.11123	0.0321	0.20145	0.1062	0.07113	0.22469	0.2785	0.151	0.1231
2008-09	0.07592	0.1139	0.1408	0.0437	0.26118	0.1882	0.03678	0.2132	0.34824	0.15465	0.22614	0.13598
2009-10	0.10752	0.07651	0.08268	0.04478	0.06543	0.05822	0.0727	0.17215	0.24173	0.2454	0.2415	0.0717
2010-11	0.0531	0.04228	0.05261	0.1602	0.03767	0.06374	0.05528	0.10513	0.11533	0.19181	0.09654	0.1125
2011-12	0.209	0.0033	0.13686	0.27908	0.1656	0.0915	0.081	0.12843	0.22396	0.24982	0.1312	0.17453
2012-13	0.10053	0.0581	0.1691	0.345	0.137	0.0868	0.049	0.3249	0.3289	0.057	0.15557	0.18095
2013-14	0.07463	0.1669	0.03957	0.0758	0.0392	0.0697	0.1078	0.42455	0.07678	0.17307	0.19273	0.23653
2014-15	0.172	0.0306	0.11653	0.159	0.03227	0.11615	0.091	0.1636	0.1426	0.0837	0.0506	0.12046
2015-16	0.09453	0.093	0.0892	0.13533	0.17983	0.0911	0.09023	0.23916	0.15246	0.2614	0.182	0.1989
2016-17	0.20275	0.10248	0.11023	0.0942	0.10493	0.2033	0.2504	0.18268	0.0807	0.27759	0.23024	0.16445
2017-18	0.2743	0.16953	0.1926	0.2196	0.0571	0.08173	0.0485	0.0515	0.26657	0.06377	0.07892	0.1097
2018-19	0.07223	0.045	0.33908	0.28955	0.0836	0.11745	0.088	0.28988	0.06234	0.13336	0.0892	0.11445
2019-20	0.1326	0.0857	0.1484	0.0893	0.27558	0.0689	0.0222	0.117	0.19075	0.13307	0.2527	0.20028

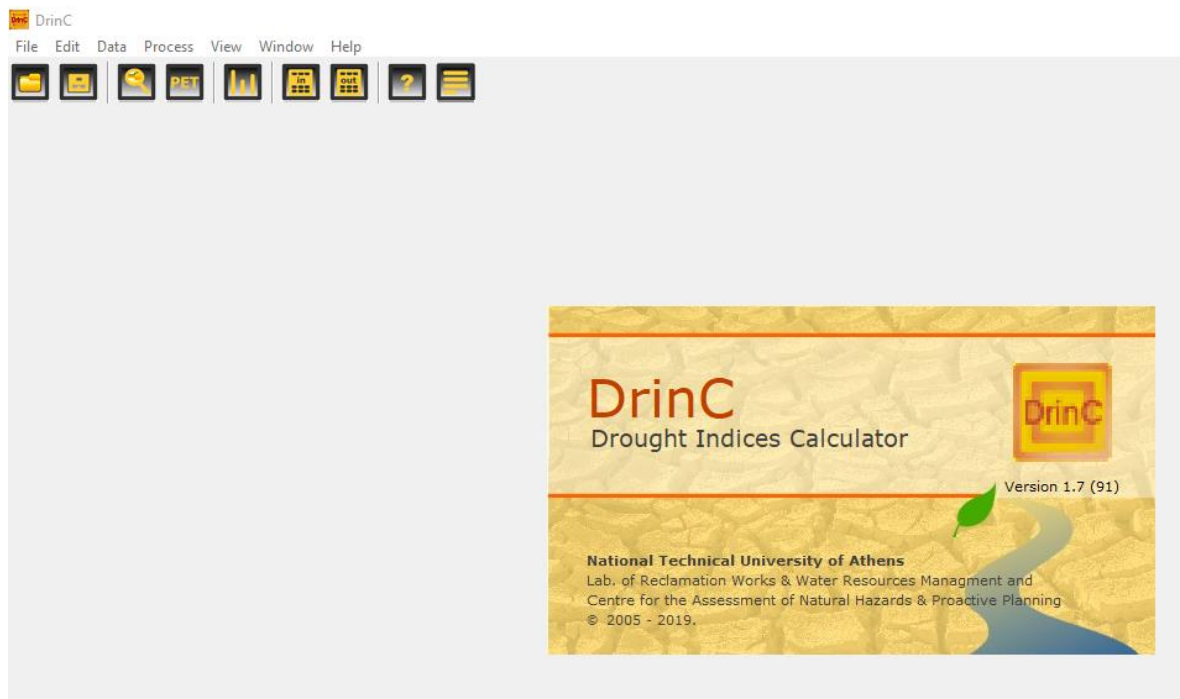


2. Το αρχείο Excel της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (PET) θα είναι της μορφής:

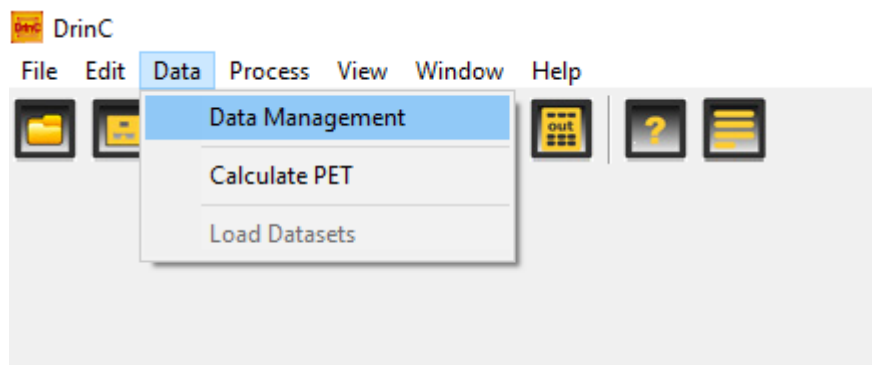
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Year	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
1996-97	25.5661	19.3088	7.50384	10.6167	17.917	14.1202	18.8389	44.0785	46.4749	36.476	49.7189	37.719
1997-98	21.7988	15.6943	9.20427	17.101	21.6667	16.8579	27.2781	45.1179	47.2633	43.3962	52.2336	28.7427
1998-99	20.3177	7.77398	13.1164	20.3184	6.46982	18.4392	23.0229	38.5228	38.1468	54.0951	42.0733	39.7238
1999-00	27.2918	11.6438	13.0128	7.90383	13.8129	14.4936	38.997	50.3823	63.1714	39.3448	61.5939	30.4587
2000-01	35.3298	20.8898	15.6786	11.29	15.2675	15.478	23.7917	46.8993	31.801	48.9398	45.5889	15.1866
2001-02	32.9074	6.96858	5.02456	15.9884	14.9586	24.3457	20.9451	42.522	57.2869	47.6598	35.1339	24.3884
2002-03	17.5181	15.8279	6.15622	7.02012	11.4004	22.0084	28.8051	42.6437	60.3634	52.6133	76.8593	36.9968
2003-04	15.489	18.434	15.3461	6.8307	12.6616	20.1916	28.0916	28.9104	37.5047	40.9574	47.0587	28.6006
2004-05	25.7013	10.1379	12.2757	10.3844	5.58589	14.5667	25.7811	38.9073	44.6444	47.4664	29.0726	30.3919
2005-06	30.0592	11.3903	5.06476	11.3125	8.16391	14.6672	24.0756	34.9044	43.4486	72.8744	28.6511	39.4258
2006-07	36.1586	19.3356	18.8673	13.0272	14.0734	20.9341	45.1694	45.6	52.9657	57.0088	45.4527	24.4022
2007-08	19.3538	10.2505	12.2225	15.8162	19.1281	15.8214	24.4336	53.3281	45.0399	43.388	46.3068	28.8957
2008-09	27.0282	20.4508	11.1806	10.542	8.59272	10.7178	51.6956	37.742	32.324	56.4262	50.1509	30.3961
2009-10	19.9704	24.6654	10.9244	3.86878	11.9813	22.481	32.452	21.0741	46.9156	63.7669	44.6102	27.4867
2010-11	23.6734	16.5611	10.4407	10.4814	12.2824	25.8734	38.5727	49.3464	43.6951	40.7253	68.2634	51.5978
2011-12	29.1102	30.1788	12.7981	8.02646	4.87193	26.291	40.6845	51.8418	53.3665	46.0976	66.2662	37.2605
2012-13	30.6566	22.5149	12.752	5.75281	3.11003	15.7344	29.8468	29.0228	47.6448	85.5644	74.4397	26.8294
2013-14	30.7142	12.8784	21.4736	18.4924	21.4928	34.3689	33.1619	36.258	101.688	53.2639	36.5575	22.6376
2014-15	30.1722	19.7769	11.1566	9.40519	10.9077	19.3279	32.5019	29.7689	45.9931	77.0729	85.2935	28.3862
2015-16	18.6392	26.6934	23.0696	9.24802	12.4426	15.895	34.3123	30.0509	38.58	46.5468	42.6906	41.6751
2016-17	11.854	12.0482	12.7615	9.82275	13.7882	18.2798	16.6923	39.9489	55.166	51.6686	55.512	19.7973
2017-18	24.6056	11.0093	8.41852	9.77861	3.29311	12.634	49.0408	41.9455	38.6198	61.2366	69.0356	38.1351
2018-19	29.319	15.1259	6.25477	4.17214	18.8296	20.3348	28.6482	21.3004	63.1463	56.4904	45.6229	24.5744
2019-20	31.2798	11.8265	13.4994	14.4084	14.9939	17.9697	41.892	26.1833	31.292	48.9686	49.8028	31.6774

## B. Βήματα Υπολογισμού του δείκτη RDI

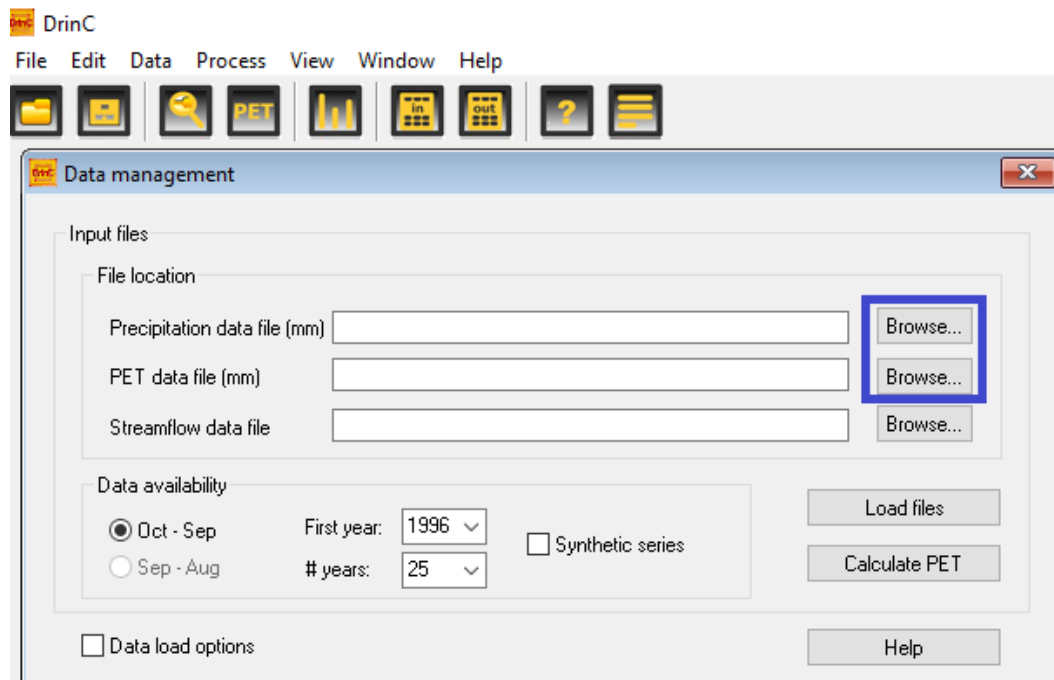
### 1. Ανοίγω το λογισμικό DrinC



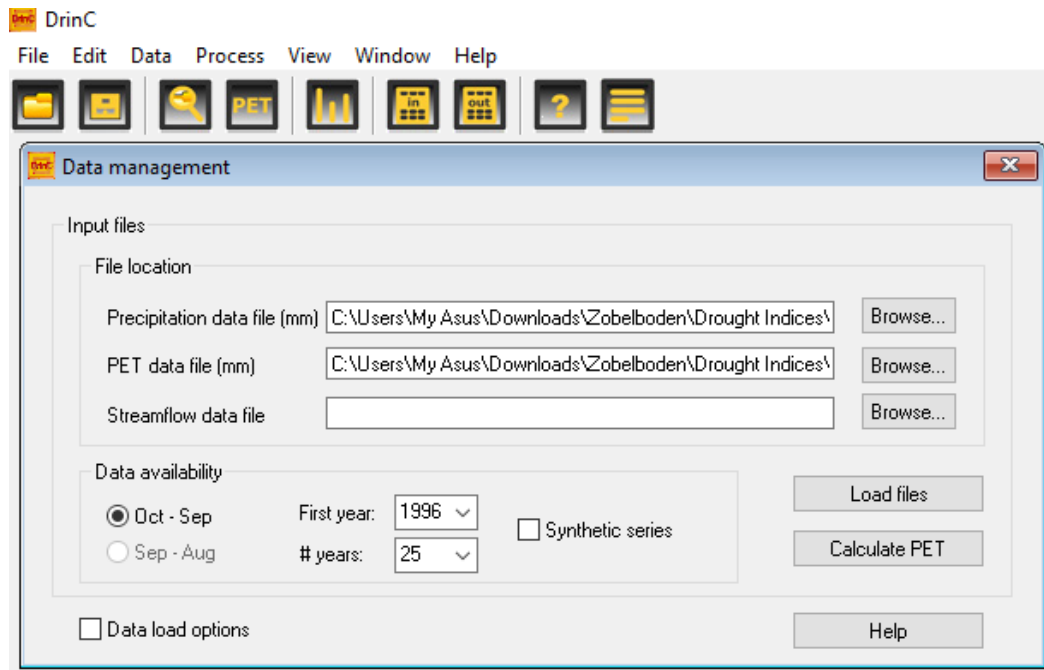
### 2. Επιλέγω Data → Data Management για να εισάγω τις χρονοσειρές των μετρήσεων βροχόπτωσης και εξατμισοδιαπνοής



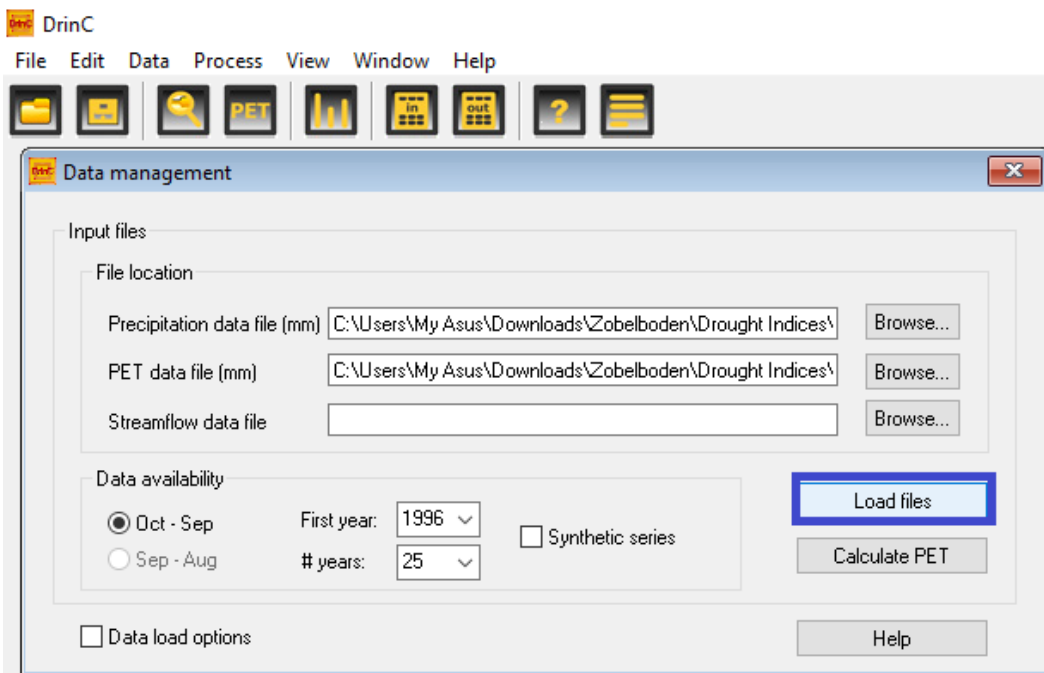
3. Πατώντας το "Browse" επιλέγω κάθε φορά το αντίστοιχο αρχείο Excel με τα δεδομένα (Precipitation, PET)



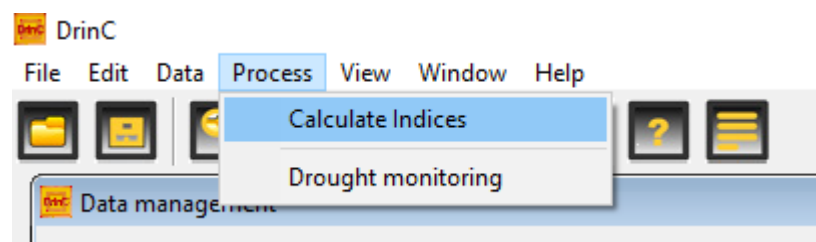
4. Επιλέγω:
  - το έτος αρχής των μετρήσεων (1996)
  - τον συνολικό αριθμό ετών (25)



5. Πατώντας το “load files” το λογισμικό φορτώνει τα δεδομένα και είναι έτοιμο να υπολογίσει το δείκτη ξηρασίας



6. Επιλέγω Process → Calculate Indices



7. Επιλέγω:

- Δείκτη ξηρασίας (drought index) → RDI
- Όνομα εξερχόμενου αρχείου (output file) με τον υπολογισμένο δείκτη π.χ. RDI
- Κατανομή γάμμα (gamma distribution)
- Περίοδο αναφοράς (reference period) → 12 μήνες
- Χρονικό βήμα (Time step) → μηνιαία (monthly)

**Drought indices**

**Drought Index**

☐ SPI (Standardised Precipitation Index) ☐ aSPI (Agricultural Standardised Precipitation Index)

☒ RDI (Reconnaissance Drought Index) ☐ eRDI (Effective Reconnaissance Drought Index)

☐ SDI (Streamflow Drought Index) ☐ Precipitation Deciles (PD)

**RDI (Reconnaissance Drought Index)**

Output file:   ☐ Open after calculation

**Distribution**

☒ Gamma ☐ Log-normal

☒ a0 (initial value) ☒ Normalised ☒ Standardised

☒ Aridity Index (UNEP)

**Calculation settings**

**Reference period (time scale)**

☐ 12-month ☐ 6-month ☐ 3-month ☐ 1-month ☒ Other (define)



-month

**Time step (calculation time interval)**

☐ Annual ☒ Monthly ☐ Group results per period

☐ Multi-points mode

8. Πατώντας το "Calculate" το λογισμικό υπολογίζει τον επιλεγόμενο δείκτη ξηρασίας και δημιουργεί ένα αρχείο Excel με το όνομα RDI.xlsx


**Drought indices**


Drought Index

☐ SPI (Standardised Precipitation Index)
☐ aSPI (Agricultural Standardised Precipitation Index)

☒ RDI (Reconnaissance Drought Index)
☐ eRDI (Effective Reconnaissance Drought Index)

☐ SDI (Streamflow Drought Index)
☐ Precipitation Deciles (PD)

RDI (Reconnaissance Drought Index)

Output file:  
☐ Open after calculation

Distribution

☒ Gamma
☐ Log-normal

☒ a0 (initial value)
☒ Normalised
☒ Standardised

☒ Aridity Index (UNEP)

Calculation settings

Reference period (time scale)

☐ 12-month
☐ 6-month
☐ 3-month
☐ 1-month
☒ Other (define)

-month

Time step (calculation time interval)

☐ Annual
☒ Monthly
☐ Group results per period

☐ Multi-points mode

12-month R	$\alpha_{12}$	Normalise	Standardised
Month (last month of the corresponding period)			
Σεπ-97	0.01	0.11	0.41
Οκτ-97	0.01	0.13	0.26
Νοε-97	0.00	0.11	0.18
Δεκ-97	0.01	0.15	0.32
Ιαν-98	0.01	0.16	0.36
Φεβ-98	0.00	0.08	0.06
Μαρ-98	0.00	0.11	0.17
Απρ-98	0.00	0.04	-0.11
Μαϊ-98	0.00	0.01	-0.24
Ιουν-98	0.00	0.03	-0.17
Ιουλ-98	0.00	-0.13	-1.06
Αυγ-98	0.00	-0.14	-0.89
Σεπ-98	0.00	0.00	-0.16
Οκτ-98	0.00	0.06	-0.07
Νοε-98	0.00	0.10	0.13
Δεκ-98	0.00	0.09	0.08
Ιαν-99	0.00	0.10	0.12
Φεβ-99	0.01	0.29	0.81
Μαρ-99	0.01	0.15	0.33
Απρ-99	0.01	0.20	0.50
Μαϊ-99	0.01	0.22	0.57

Φύλλο1

Φεβ-19	0.00	-0.12	-0.77
Μαρ-19	0.00	-0.11	-0.75
Απρ-19	0.00	-0.03	-0.42
Μαϊ-19	0.01	0.18	0.43
Ιουν-19	0.00	-0.03	-0.38
Ιουλ-19	0.00	0.04	-0.14
Αυγ-19	0.00	0.11	0.18
Σεπ-19	0.01	0.11	0.38
Οκτ-19	0.01	0.20	0.53
Νοε-19	0.01	0.23	0.62
Δεκ-19	0.00	0.08	0.04
Ιαν-20	0.00	-0.09	-0.59
Φεβ-20	0.00	0.04	-0.10
Μαρ-20	0.00	0.02	-0.18
Απρ-20	0.00	-0.05	-0.50
Μαϊ-20	0.00	-0.17	-1.05
Ιουν-20	0.00	-0.01	-0.31
Ιουλ-20	0.00	0.03	-0.21
Αυγ-20	0.00	0.12	0.22
Σεπ-20	0.01	0.10	0.35

Παράρτημα IV: Πίνακες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της συμπεριφοράς της GPP σε φαινόμενα ξηρασίας

Πίνακας Π4.1. Υπολογιζόμενος δείκτης ξηρασίας Standardized RDI

<b>Μήνας – Έτος</b>	<b>Standardized RDI</b>
Σεπ-97	0.41
Οκτ-97	0.26
Νοε-97	0.18
Δεκ-97	0.32
Ιαν-98	0.36
Φεβ-98	0.06
Μαρ-98	0.17
Απρ-98	-0.11
Μαϊ-98	-0.24
Ιουν-98	-0.17
Ιουλ-98	-1.06
Αυγ-98	-0.89
Σεπ-98	-0.16
Οκτ-98	-0.07
Νοε-98	0.13
Δεκ-98	0.08
Ιαν-99	0.12
Φεβ-99	0.81
Μαρ-99	0.33
Απρ-99	0.50
Μαϊ-99	0.57
Ιουν-99	0.65
Ιουλ-99	1.04
Αυγ-99	1.04
Σεπ-99	0.33
Οκτ-99	-0.15
Νοε-99	-0.36
Δεκ-99	-0.32
Ιαν-00	0.02
Φεβ-00	-0.31
Μαρ-00	0.14
Απρ-00	-0.18
Μαϊ-00	-0.19
Ιουν-00	-0.71
Ιουλ-00	-0.75
Αυγ-00	-0.92
Σεπ-00	-0.63
Οκτ-00	-0.48
Νοε-00	-0.53
Δεκ-00	-0.69
Ιαν-01	-1.04
Φεβ-01	<b>-1.52</b>
Μαρ-01	<b>-1.84</b>
Απρ-01	<b>-1.47</b>
Μαϊ-01	<b>-1.71</b>
Ιουν-01	-0.92

Ιουλ-01	-1.21
Αυγ-01	-0.67
Σεπ-01	-0.26
Οκτ-01	-0.36
Νοε-01	0.03
Δεκ-01	0.45
Ιαν-02	0.52
Φεβ-02	0.70
Μαρ-02	0.76
Απρ-02	0.79
Μαϊ-02	0.70
Ιουν-02	0.41
Ιουλ-02	0.50
Αυγ-02	1.14
Σεπ-02	0.77
Οκτ-02	1.42
Νοε-02	1.27
Δεκ-02	1.16
Ιαν-03	1.33
Φεβ-03	1.27
Μαρ-03	1.01
Απρ-03	0.82
Μαϊ-03	1.10
Ιουν-03	0.73
Ιουλ-03	1.01
Αυγ-03	-0.60
Σεπ-03	-1.17
Οκτ-03	<b>-1.64</b>
Νοε-03	<b>-1.97</b>
Δεκ-03	<b>-2.34</b>
Ιαν-04	<b>-2.25</b>
Φεβ-04	<b>-2.12</b>
Μαρ-04	<b>-1.99</b>
Απρ-04	<b>-2.07</b>
Μαϊ-04	<b>-1.67</b>
Ιουν-04	-1.29
Ιουλ-04	-1.25
Αυγ-04	-0.28
Σεπ-04	0.17
Οκτ-04	0.22
Νοε-04	0.58
Δεκ-04	0.46
Ιαν-05	0.29
Φεβ-05	0.53
Μαρ-05	1.41
Απρ-05	1.79
Μαϊ-05	1.71
Ιουν-05	1.45
Ιουλ-05	2.03
Αυγ-05	2.06
Σεπ-05	2.18
Οκτ-05	1.87
Νοε-05	1.46



Δεκ-05	1.74
Ιαν-06	2.00
Φεβ-06	1.86
Μαρ-06	1.42
Απρ-06	1.48
Μαϊ-06	1.54
Ιουν-06	1.82
Ιουλ-06	1.16
Αυγ-06	1.40
Σεπ-06	1.15
Οκτ-06	1.17
Νοε-06	1.20
Δεκ-06	0.82
Ιαν-07	0.55
Φεβ-07	0.54
Μαρ-07	0.20
Απρ-07	-0.32
Μαϊ-07	-0.41
Ιουν-07	-0.80
Ιουλ-07	-0.48
Αυγ-07	-1.41
Σεπ-07	-0.43
Οκτ-07	-0.07
Νοε-07	0.01
Δεκ-07	0.24
Ιαν-08	0.07
Φεβ-08	-0.22
Μαρ-08	0.15
Απρ-08	0.67
Μαϊ-08	0.12
Ιουν-08	0.36
Ιουλ-08	1.06
Αυγ-08	0.99
Σεπ-08	0.16
Οκτ-08	-0.02
Νοε-08	-0.18
Δεκ-08	-0.10
Ιαν-09	-0.21
Φεβ-09	0.45
Μαρ-09	0.50
Απρ-09	0.02
Μαϊ-09	0.57
Ιουν-09	0.99
Ιουλ-09	0.71
Αυγ-09	0.71
Σεπ-09	0.79
Οκτ-09	0.96
Νοε-09	0.72
Δεκ-09	0.56
Ιαν-10	0.61
Φεβ-10	0.10
Μαρ-10	-0.36
Απρ-10	-0.01

Μαϊ-10	0.10
Ιουν-10	-0.41
Ιουλ-10	-0.25
Αυγ-10	-0.11
Σεπ-10	-0.34
Οκτ-10	-0.50
Νοε-10	-0.44
Δεκ-10	-0.52
Ιαν-11	-0.27
Φεβ-11	-0.40
Μαρ-11	-0.42
Απρ-11	-0.53
Μαϊ-11	-1.04
Ιουν-11	-1.38
Ιουλ-11	<b>-1.57</b>
Αυγ-11	<b>-2.07</b>
Σεπ-11	<b>-2.55</b>
Οκτ-11	<b>-1.85</b>
Νοε-11	<b>-1.88</b>
Δεκ-11	<b>-1.62</b>
Ιαν-12	-1.24
Φεβ-12	-0.94
Μαρ-12	-0.87
Απρ-12	-0.82
Μαϊ-12	-0.79
Ιουν-12	-0.62
Ιουλ-12	-0.62
Αυγ-12	-0.43
Σεπ-12	-0.21
Οκτ-12	-0.44
Νοε-12	-0.19
Δεκ-12	-0.12
Ιαν-13	0.03
Φεβ-13	-0.04
Μαρ-13	0.08
Απρ-13	0.16
Μαϊ-13	0.89
Ιουν-13	1.15
Ιουλ-13	0.37
Αυγ-13	0.26
Σεπ-13	0.40
Οκτ-13	0.35
Νοε-13	0.67
Δεκ-13	0.26
Ιαν-14	-0.46
Φεβ-14	-0.93
Μαρ-14	-1.14
Απρ-14	-1.03
Μαϊ-14	-0.86
Ιουν-14	<b>-1.89</b>
Ιουλ-14	<b>-1.64</b>
Αυγ-14	-0.95
Σεπ-14	-0.94

ΟΚΤ-14	-0.58
Νοε-14	-0.89
Δεκ-14	-0.61
Ιαν-15	-0.33
Φεβ-15	-0.29
Μαρ-15	-0.01
Απρ-15	-0.02
Μαϊ-15	-0.60
Ιουν-15	0.23
Ιουλ-15	-0.33
Αυγ-15	-1.23
Σεπ-15	<b>-1.93</b>
ΟΚΤ-15	<b>-1.90</b>
Νοε-15	<b>-1.56</b>
Δεκ-15	<b>-1.71</b>
Ιαν-16	<b>-1.73</b>
Φεβ-16	<b>-1.45</b>
Μαρ-16	<b>-1.49</b>
Απρ-16	<b>-1.52</b>
Μαϊ-16	-1.31
Ιουν-16	-1.20
Ιουλ-16	-0.47
Αυγ-16	0.48
Σεπ-16	0.53
ΟΚΤ-16	0.92
Νοε-16	1.05
Δεκ-16	1.21
Ιαν-17	1.06
Φεβ-17	0.88
Μαρ-17	1.14
Απρ-17	1.87
Μαϊ-17	1.57
Ιουν-17	1.10
Ιουλ-17	1.38
Αυγ-17	1.07
Σεπ-17	1.46
ΟΚΤ-17	1.38
Νοε-17	1.40
Δεκ-17	1.58
Ιαν-18	1.76
Φεβ-18	1.89
Μαρ-18	1.75
Απρ-18	0.88
Μαϊ-18	0.54
Ιουν-18	1.16
Ιουλ-18	0.72
Αυγ-18	0.02
Σεπ-18	-0.45
ΟΚΤ-18	-1.03
Νοε-18	-1.31
Δεκ-18	-0.86
Ιαν-19	-0.61
Φεβ-19	-0.77

Μαρ-19	-0.75
Απρ-19	-0.42
Μαϊ-19	0.43
Ιουν-19	-0.38
Ιουλ-19	-0.14
Αυγ-19	0.18
Σεπ-19	0.38
Οκτ-19	0.53
Νοε-19	0.62
Δεκ-19	0.04
Ιαν-20	-0.59
Φεβ-20	-0.10
Μαρ-20	-0.18
Απρ-20	-0.50
Μαϊ-20	-1.05
Ιουν-20	-0.31
Ιουλ-20	-0.21
Αυγ-20	0.22
Σεπ-20	0.35

Πίνακας Π4.2. Μεγέθη μελέτης επίδρασης ξηρασίας στην GPP

Μήνας – Έτος	n	RDI	$\overline{RDI}$	DI	GPP (mol C m <sup>-2</sup> )	Response Index
Φεβ-01	4	-1.52	-1.64	-6.54		
Μαρ-01		-1.84				
Απρ-01		-1.47				
Μαϊ-01		-1.71				
Ιουν-01					2.94	29.60
Ιουλ-01					2.59	
Αυγ-01					2.67	
Σεπ-01					3.52	
Οκτ-01					1.44	
Νοε-01					2.03	
Δεκ-01					0.61	
Ιαν-02					2.92	
Φεβ-02					2.79	
Μαρ-02					3.62	
Απρ-02					2.68	
Μαϊ-02					1.80	
Οκτ-03	8	-1.64	-2.01	-16.06		
Νοε-03		-1.97				
Δεκ-03		-2.34				
Ιαν-04		-2.25				
Φεβ-04		-2.12				
Μαρ-04		-1.99				
Απρ-04		-2.07				
Μαϊ-04		-1.67				
Ιουν-04					3.18	33.83
Ιουλ-04					3.39	
Αυγ-04					2.99	
Σεπ-04					2.87	

ΟΚΤ-04					1.75	
Νοε-04					2.01	
Δεκ-04					1.24	
Ιαν-05					1.96	
Φεβ-05					0.63	
Μαρ-05					5.76	
Απρ-05					3.78	
Μαϊ-05					4.28	
Ιουλ-11	6	-1.57	-1.92	-11.54		
Αυγ-11		-2.07				
Σεπ-11		-2.55				
ΟΚΤ-11		-1.85				
Νοε-11		-1.88				
Δεκ-11		-1.62				
Ιαν-12					2.35	30.33
Φεβ-12					0.19	
Μαρ-12					3.06	
Απρ-12					2.84	
Μαϊ-12					3.10	
Ιουν-12					3.74	
Ιουλ-12					3.78	
Αυγ-12					2.55	
Σεπ-12					2.66	
ΟΚΤ-12					1.91	
Νοε-12					1.60	
Δεκ-12					2.56	
Ιουν-14	2	-1.89	-1.77	-3.53		
Ιουλ-14		-1.64				
Αυγ-14					2.90	26.87
Σεπ-14					3.16	
ΟΚΤ-14					2.51	
Νοε-14					1.40	
Δεκ-14					2.10	
Ιαν-15					2.37	
Φεβ-15					1.42	
Μαρ-15					2.11	
Απρ-15					1.97	
Μαϊ-15					2.57	
Ιουν-15					2.41	
Ιουλ-15					1.96	
Σεπ-15	8	-1.93	-1.66	-13.28		
ΟΚΤ-15		-1.90				
Νοε-15		-1.56				
Δεκ-15		-1.71				
Ιαν-16		-1.73				
Φεβ-16		-1.45				
Μαρ-16		-1.49				
Απρ-16		-1.52				
Μαϊ-16					3.09	32.16
Ιουν-16					2.50	
Ιουλ-16					3.39	
Αυγ-16					2.70	
Σεπ-16					2.78	

Οκτ-16					2.70	
Νοε-16					1.91	
Δεκ-16					1.96	
Ιαν-17					0.72	
Φεβ-17					2.93	
Μαρ-17					3.63	
Απρ-17					3.86	

Πίνακας Π4.3. Μεγέθη μελέτης επίδρασης ξηρασίας στην ανθεκτικότητα

Μήνας – Έτος	GPP (mol C m <sup>-2</sup> )	GPP <sub>max</sub> (mol C m <sup>-2</sup> )	Resilience Index
Ιουν-01	2.94	3.62	0.63
Ιουλ-01	2.59		
Αυγ-01	2.67		
Σεπ-01	3.52		
Οκτ-01	1.44		
Νοε-01	2.03		
Δεκ-01	0.61		
Ιαν-02	2.92		
Φεβ-02	2.79		
Μαρ-02	3.62		
Απρ-02	2.68		
Μαϊ-02	1.80		
Ιουν-04	3.18	5.76	1.00
Ιουλ-04	3.39		
Αυγ-04	2.99		
Σεπ-04	2.87		
Οκτ-04	1.75		
Νοε-04	2.01		
Δεκ-04	1.24		
Ιαν-05	1.96		
Φεβ-05	0.63		
Μαρ-05	5.76		
Απρ-05	3.78		
Μαϊ-05	4.28		
Ιαν-12	2.35	3.78	0.66
Φεβ-12	0.19		
Μαρ-12	3.06		
Απρ-12	2.84		
Μαϊ-12	3.10		
Ιουν-12	3.74		
Ιουλ-12	3.78		
Αυγ-12	2.55		
Σεπ-12	2.66		
Οκτ-12	1.91		
Νοε-12	1.60		
Δεκ-12	2.56		
Αυγ-14	2.90	3.16	0.55
Σεπ-14	3.16		
Οκτ-14	2.51		

Νοε-14	1.40		
Δεκ-14	2.10		
Ιαν-15	2.37		
Φεβ-15	1.42		
Μαρ-15	2.11		
Απρ-15	1.97		
Μαϊ-15	2.57		
Ιουν-15	2.41		
Ιουλ-15	1.96		
Μαϊ-16	3.09	3.86	0.67
Ιουν-16	2.50		
Ιουλ-16	3.39		
Αυγ-16	2.70		
Σεπ-16	2.78		
Οκτ-16	2.70		
Νοε-16	1.91		
Δεκ-16	1.96		
Ιαν-17	0.72		
Φεβ-17	2.93		
Μαρ-17	3.63		
Απρ-17	3.86		
GPP <sub>max _ever</sub>		5.76	