

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΜΑΣΤΕΡ

«Διερεύνηση της επίδρασης της ξηρασίας στα ενεργειακά αποθέματα των δένδρων ως μηχανισμός που μπορεί να τα οδηγήσει σε απονέκρωση»

Βαλεντίνα Ιακώβου

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημήτριος Σαρρής

Σεπτέμβριος, 2015

Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

*«Διερεύνηση της επίδρασης της ξηρασίας στα ενεργειακά αποθέματα των δένδρων
ως μηχανισμός που μπορεί να τα οδηγήσει σε απονέκρωση»*

Βαλεντίνα Ιακώβου

Επιβλέπων Καθηγητής
Δημήτριος Σαρρής

Σεπτέμβριος, 2015

«Αν τα δέντρα μας παρείχαν wi-fi,
θα φυτεύαμε τόσα πολλά που πιθανότατα να σώζαμε τον πλανήτη μας!
Κρίμα που απλώς μας παρέχουν το οξυγόνο που αναπνέουμε...»

Περιεχόμενα

Περίληψη	σελ. vi
Summary	σελ. vii
Ευχαριστίες	σελ. viii
1. Εισαγωγή	σελ.1
1.1 Ξηρασία	σελ.2
1.1.1 Ορισμός της ξηρασίας	σελ.2
1.1.2 Τύποι ξηρασίας	σελ.3
1.1.3 Παράγοντες εκτίμησης της ξηρασίας	σελ.4
1.1.4 Μεσογειακό κλίμα και ξηρασία	σελ.5
1.1.5 Δάση, ξηρασία και κλιματική αλλαγή	σελ.7
1.2 Η κίνηση του νερού και των προϊόντων της φωτοσύνθεσης εντός των φυτών	σελ.10
1.3 Χαρακτηριστικά χαλεπίου πεύκης	σελ.11
1.4 Μηχανισμοί προσαρμογής χαλεπίου πεύκης στο μεσογειακό κλίμα	σελ.13
2. Θνησιμότητα δασών – Βιβλιογραφική ανασκόπηση	σελ.15
2.1 Θεωρίες σχετικά με τη δασική θνησιμότητα	σελ.16
2.1.1 Απονέκρωση δένδρων λόγω σπηλαίωσης του ξυλώματος και πλασμόλυσης των κυττάρων	σελ.17
2.1.2 Απονέκρωση δένδρων λόγω έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων	σελ.18
3. Μεθοδολογία	σελ.20
3.1 Ερευνητικά ερωτήματα	σελ.20
3.2 Περιοχές δειγματοληψίας	σελ.21
3.3 Θέσεις δειγματοληψίας και πειραματικό υλικό	σελ.24
3.4 Δειγματοληψία και επεξεργασία δειγμάτων	σελ.30
3.5 Εργαστηριακή επεξεργασία δειγμάτων	σελ.34
3.6 Μετρήσεις υδατικού δυναμικού	σελ.34
3.7 Προσδιορισμός φαινολογικού σταδίου	σελ.36
3.8 Στατιστική Ανάλυση	σελ.38
4. Αποτελέσματα	σελ.39
4.1 Υδατικές συνθήκες ανά βιότοπο	σελ.39
4.2 Συγκρίσεις των συγκεντρώσεων των μη δομικών υδατανθράκων των δένδρων	σελ.40

ανά ιστό, περιοχή και εποχή	
4.3 Συσχέτιση δυναμικού νερού και συγκέντρωσης μη δομικών υδατανθράκων των δένδρων ανά ιστό, περιοχή και εποχή	σελ.56
4.4 Συνολικά Αποτελέσματα	σελ.72
5. Συζήτηση	σελ.73
1. Στόχοι και αξιολόγηση του ερευνητικού σχεδιασμού	σελ.73
2. Σύνθεση και ερμηνεία των κύριων αποτελεσμάτων	σελ.74
Περιορισμοί της μελέτης	σελ.76
Συμπεράσματα	σελ.77
Εισηγήσεις	σελ.77
Βιβλιογραφία	σελ.78
Διαδικτυακές Πηγές	σελ.85

Περίληψη

Οι μηχανισμοί που επιδρούν στη φυσιολογία των φυτών οδηγώντας τα σε δασική θνησιμότητα πιθανολογείται ότι σχετίζονται με τη διακύμανση των επιπέδων των ενεργειακών αποθεμάτων των δένδρων και δεν έχουν ακόμη διαλευκανθεί. Σημείο κλειδί, σχετικά, θεωρείται η κατανόηση του πως μεταβάλλονται οι μη δομικοί υδατάνθρακες (Non Structural Carbohydrates-NSC, δηλ. τα σάκχαρα και το άμυλο) στους φυτικούς ιστούς σε συνθήκες ξηρασίας.

Ενώ η περιοδική μείωση των συγκεντρώσεων NSC εντός των φυτικών ιστών υποδεικνύει ότι η ζήτηση για άνθρακα ξεπερνάει τη δεδομένη προσφορά, μια σταθερά υψηλή συγκέντρωση NSC συντείνει στο ότι η φωτοσύνθεση καλύπτει ή και υπερβαίνει τις δομικές, μεταβολικές ή άλλες ανάγκες του φυτού. Σκοπός της Διατριβής είναι η διερεύνηση των αιτιών που οδηγούν τα δέντρα σε απονέκρωση και επικεντρώνεται στη χαλέπιο πεύκη (*Pinus halepensis* Mill.). Εξετάστηκε αν η απονέκρωση των δένδρων σε συνθήκες ξηρασίας μπορεί να οφείλεται σε σταδιακή «λιμοκτονία» τους λόγω έλλειψης NSC. Τυχόν απόρριψη αυτής της υπόθεσης αφήνει ανοικτό το ενδεχόμενο η απονέκρωση να προκαλείται λόγω υδραυλικής κατάρρευσης. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου έγινε μέτρηση της διακύμανσης των NSC σε βελόνες, φλοιώμα κλαδιών, ξύλωμα κλαδιών, κορμού και ρίζας σε δείγματα 60 δέντρων από 5 βιότοπους με διαφορετικά επίπεδα εδαφικής υγρασίας στην Ελλάδα και στη Γαλλία την άνοιξη και στο τέλος της ξηρής περιόδου.

Βρέθηκε ότι, οι συγκεντρώσεις NSC στο ξύλωμα κορμού (και κλαδιών το καλοκαίρι) εμφανίζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τους στους ξηρούς βιοτόπους, με στατιστικώς σημαντική συσχέτιση μεταξύ αυξημένης ξηρότητας βιοτόπων (δυναμικού νερού πριν την αυγή) και αυξημένων συγκεντρώσεων NSC. Πάρα τις ενδείξεις για μείωση στους ρυθμούς της φωτοσύνθεσης το τέλος του καλοκαιριού (πολύ μειωμένα NSC σε βελόνες και φλοιώμα στους ξηρούς βιοτόπους) δεν μεταφράστηκαν σε μειωμένες συγκεντρώσεις NSC στους αποταμιευτικούς ιστούς (ξύλωμα κορμού και κλαδιών). Η πιθανότερη εξήγηση είναι ότι κατά την υγρή περίοδο που προηγήθηκε οι ρυθμοί της φωτοσύνθεσης (προσφοράς NSC) θα πρέπει να ήταν υψηλότεροι από τους ρυθμούς αύξησης (ζήτησης NSC) των δένδρων. Κατά συνέπεια στους αποταμιευτικούς ιστούς (κορμό και κλαδιά) των ξηρότερων βιοτόπων διατηρείται ακόμη περίσσειμα NSC στο τέλος του καλοκαιριού μιας και ο ρυθμός των κυτταρικών διαιρέσεων στους βλαστούς (αύξηση) έχει σχεδόν σταματήσει λόγω έλλειψης του αναγκαίου νερού.

Τα παραπάνω ευρήματα υποδεικνύουν πως δεν μπορεί να υποστηριχθεί η άποψη ότι υπάρχει έλλειψη σε σάκχαρα και άμυλο στους αποταμιευτικούς ιστούς, καθώς η καταπόνηση από ξηρασία μεγαλώνει. Άρα η υπόθεση της σταδιακής «λιμοκτονίας» λόγω έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων δεν είναι η επικρατέστερη, όταν πριν την ξηρή περίοδο υπάρχει επάρκεια υγρασίας για την υποστήριξη υψηλών ρυθμών φωτοσύνθεσης (προσφοράς NSC) αλλά οι ρυθμοί αύξησης (ζήτησης NSC) βρίσκονται σε χαμηλότερα επίπεδα. Συνεπώς, δεν μπορεί να αναμένεται ότι στα Μεσογειακά Οικοσυστήματα η αύξηση του CO₂ της ατμόσφαιρας θα επιταχύνει τους ρυθμούς αύξησης της ξυλώδους βλάστησης μιας και τα δένδρα (όσο και θαμνώδη είδη) δεν εμφανίζουν έλλειμμα άνθρακα. Η παραπάνω γνώση είναι κρίσιμη για τη βελτίωση των νέων βιοκλιματικών και των μοντέλων του κύκλου του άνθρακα που στοχεύουν στην πρόβλεψη της ανταπόκρισης των δασών και της αλληλεπίδρασής τους με την ατμόσφαιρα σε συνθήκες αυξανόμενων εκλύσεων των «αερίων του θερμοκηπίου».

Summary

Forest mortality under drought is considered to be related to a depletion of tree energy reserves an issue, however, which still needs to be clarified. A key related aspect is in the understanding of how Non Structural Carbohydrate concentrations - NSC (sugars and starch) change under drought.

The periodic decline in plant tissue NSC indicates that demand for carbon exceeds concurrent supplies, while consistently high NSC levels suggests that photosynthesis covers or exceeds the structural, metabolic or other needs of plants. The aim of this Thesis is to explore the causes behind tree mortality, focusing on *Pinus halepensis* (Mill.). It was examined whether tree mortality under drought can be caused by carbon starvation (lack in NSC). The rejection of the above hypothesis leaves open the other probable cause for tree desiccation i.e. hydraulic failure. To investigate for indications of carbon shortage, NSC levels were measured during spring and at the end of the dry season by taking needle and branch phloem samples as well as samples from branch, trunk and root xylem from 60 trees growing in 5 habitats of different moisture holding capacity in Greece and France.

Results indicated that NSC concentrations in trunk xylem (and in branch xylem in late summer) were at highest in the dry habitat trees, with significant correlations between habitat dryness (predawn water potential) and increased NSC levels. Despite the indications for reduced photosynthetic rates in late summer (very low NSC levels in needles and phloem of dry habitat trees), they were not translated into reduced NSC in carbon storing tissues (branch and trunk xylem). The most probable explanation is that during the main growing period (spring-early summer), tree photosynthetic rates (NSC supplies) were higher than actual growth rates (NSC demand). Thus, when stem growth stopped due to lack of moisture in late summer, a surplus of NSC was produced within carbon storing tissues (branch and trunk xylem) of dry habitat trees.

The above findings do not support that carbon storing tissues lack in sugars and starch as drought stress increases. Thus, carbon starvation cannot occur when before the dry period there is sufficient moisture to support high photosynthetic rates (carbon supply), but still growth rates (carbon demand) are lower leading to an NSC surplus. Such findings also support the idea that an increase in atmospheric CO₂ is unlikely to increase growth in woody vegetation of Mediterranean Ecosystems. Trees (and shrubs) within such systems do not appear to be carbon limited. Such knowledge is critical for improving new bioclimatic and carbon cycle models predicting the response and interaction of forest with the atmosphere under increased greenhouse gas emissions.

Ευχαριστίες

Η διεξαγωγή και η περαίωση μιας διατριβής αποτελεί μια σκληρή αλλά συγχρόνως επικοδομητική εμπειρία. Φθάνοντας στο τέλος της συγγραφής της παρούσας διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή της διατριβής μου κ. Δημήτριο Σαρρή, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την ευκαιρία που μου έδωσε, παραχωρώντας μου την παρούσα πολύ ενδιαφέρουσα διατριβή εργασία και να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Παράλληλα τον ευχαριστώ για την επιστημονική βοήθεια που μου παρείχε, με βάση την εμπειρία του και τις διαρκείς συμβουλές του σε όλη την πορεία της διπλωματικής εργασίας. Χωρίς την καθοδήγησή του, η πραγμάτωση της εργασίας θα ήταν αδύνατη.

Έπειτα θέλω να ευχαριστήσω το προσωπικό του Ινστιτούτου Βοτανικής του Πανεπιστημίου της Βασιλείας για την συνεργασία και για τη βοήθεια στην ανάλυση των δειγμάτων, το προσωπικό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για την υλικοτεχνική υποστήριξη και το εργαστήριο στην Γαλλία IRSTEA (Aix-en-Provence) για την συνεργασία.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την ηθική στήριξη και για την υπομονή που μου έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και τους φίλους μου για την προθυμία τους να ανταποκριθούν σε οποιαδήποτε απορία ή πρόβλημα προέκυπτε.

1.Εισαγωγή

Ο καθορισμός της έννοιας της ξηρασίας αποτελούσε ανέκαθεν τροχοπέδη στην παρακολούθηση και ανάλυση του φαινομένου. Επίσης η ιδιαίτερη πολυπλοκότητα του σε σχέση με τις υπόλοιπες φυσικές καταστροφές, καθιστούν δύσκολη την πρόβλεψη της έναρξης και της λήξης του (McKee et al., 1993). Σήμερα υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τη συγκεκριμένη έννοια, με κοινό παρονομαστή όλων αυτών το ότι η ξηρασία χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή υγρασία λόγω έλλειψης βροχοπτώσεων για μια περίοδο. Η ξηρασία παράγει ένα δίκτυο επιπτώσεων που μπορούν να είναι είτε άμεσες είτε έμμεσες σε οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό επίπεδο (NDCM, 2008).

Η ξηρασία ως κλιματικός παράγων είναι το αποτέλεσμα της περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού και της απώλειας του. Ανάλογες κλιματικές συνθήκες επικρατούν στο ένα τρίτο περίπου της χερσονήσου του πλανήτη, ενώ εποχικό ή τοπικό περιορισμό στη διαθεσιμότητα του νερού υφίσταται ένα ακόμα σημαντικό ποσοστό της ξηράς (Καραμπουρνιώτης, 2003). Σε συνθήκες κλιματικής αλλαγής η αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση των βροχοπτώσεων αναμένεται να επιτείνει την έλλειψη εδαφικής υγρασίας τους θερινούς μήνες αυξάνοντας την καταπόνηση στα δάση. Πρόσφατα φαινόμενα απονέκρωσης δένδρων αρκετών δασικών ειδών λόγω ξηρασίας καταδεικνύουν τον υπαρκτό κίνδυνο (Allen et al., 2010).

Σήμερα η συνεχώς αυξανόμενη ανησυχία για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής οδηγεί την έρευνα σε νέες κατευθύνσεις. Η συγκεκριμένη διατριβή ασχολείται με την επίδραση της ξηρασίας στα ενεργειακά αποθέματα των δένδρων, ως μηχανισμός που μπορεί να τα οδηγεί σε απονέκρωση. Οι μηχανισμοί που επιδρούν στη φυσιολογία των φυτών οδηγώντας τα σε δασική θνησιμότητα πιθανολογείται ότι σχετίζονται με τη διακύμανση των επιπέδων των ενεργειακών αποθεμάτων των δένδρων και δεν έχουν ακόμη διαλευκανθεί (McDowell et al., 2008), (Körner, 2013). Για την εκτίμηση του φαινομένου, σημείο κλειδί θεωρείται κατανόηση του πώς μεταβάλλονται οι μη δομικοί υδατάνθρακες (Non Structural Carbohydrates-NSC) στους φυτικούς ιστούς σε συνθήκες ξηρασίας.

Οι NSC αποτελούνται από γλυκόζη, φρουκτόζη, σακχαρόζη και άμυλο (Longland et al., 2006) και θεωρούνται μέτρο της έλλειψης ή αφθονίας της ενέργειας που αποθηκεύεται στους δεσμούς μεταξύ ατόμων άνθρακα (μέσω της φωτοσύνθεσης) και που στη συνέχεια απελευθερώνεται με τη διάσπαση αυτών των δεσμών για την αύξηση και τις μεταβολικές ανάγκες των δένδρων. Ενώ η περιοδική μείωση των συγκεντρώσεων NSC εντός των φυτικών ιστών υποδεικνύει ότι η ζήτηση για άνθρακα ξεπερνάει τη δεδομένη προσφορά, μια σταθερά υψηλή συγκέντρωση NSC συντείνει στο ότι η φωτοσύνθεση καλύπτει ή και υπερβαίνει τις δομικές, μεταβολικές ή άλλες ανάγκες του φυτού (Körner, 2003).

Σκοπός της διατριβής είναι η διερεύνηση των αιτιών που οδηγούν τα δέντρα σε απονέκρωση και θα επικεντρωθεί στην χαλέπιο πεύκη (*Pinus halepensis* Mill.). Θα εξεταστεί αν η απονέκρωση των δένδρων σε συνθήκες ξηρασίας μπορεί να οφείλεται σε σταδιακή «λιμοκτονία» τους λόγω έλλειψης

ενεργειακών αποθεμάτων (υδατανθράκων). Τυχόν απόρριψη αυτής της υπόθεσης αφήνει ανοικτό το ενδεχόμενο η απονέκρωση να προκαλείται λόγω πλασμόλυσης εξαιτίας σοβαρής υδατικής ανεπάρκειας. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου έγινε μέτρηση της διακύμανσης των επιπέδων των μη δομικών υδατανθράκων (NSC) σε φυτικούς ιστούς χαλεπίου πεύκης από δείγματα δέντρων που βρίσκονται σε βιότοπους με διαφορετικά επίπεδα εδαφικής υγρασίας στην Ελλάδα και στη Γαλλία.

Καθώς η ξηρασία, αναμένεται να ενταθεί στην Μεσόγειο αλλά και σε άλλα μεσαίου γεωγραφικού πλάτους σημεία του πλανήτη σε συνθήκες ανθρωπογενούς κλιματικής αλλαγής (IPCC, 2007) έρευνες όπως αυτής της διατριβής αποκτούν ιδιαίτερη σημασία. Συμπληρώνει τις μέχρι στιγμής μελέτες που γίνονται σε παγκόσμιο επίπεδο σχετικά με τα αίτια που οδηγούν τα δέντρα στην απονέκρωση και είναι από τις πρώτες που πραγματοποιούνται πάνω στην χαλέπιο πεύκη στη Μεσόγειο και μάλιστα σε τέτοια έκταση.

Η μελέτη του παραπάνω φαινομένου έχει μεγάλη σημασία ώστε να εκτιμηθεί ο κίνδυνος που διατρέχουν τα μεσογειακά (και όχι μόνο), δάση αλλά και οι λειτουργίες τους από την κλιματική αλλαγή και ιδιαίτερα, ο ρόλος τους στον κύκλο του άνθρακα (Köerner, 2003). Τα δάση διατηρούν σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, αμβλύνοντας τις επιπτώσεις της, καθώς δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) της ατμόσφαιρας και το μετατρέπουν σε βιομάζα, μειώνουν την επίδραση των ακραίων καιρικών φαινομένων και είναι απαραίτητα για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας, ενώ η απουσία τους μπορεί να επιτείνει το φαινόμενο της ερημοποίησης.

1.1 Ξηρασία

1.1.1 Ορισμός της ξηρασίας

Η ξηρασία είναι ένα επαναλαμβανόμενο φυσικό φαινόμενο που επιβάλλει σοβαρές προκλήσεις για τα οικοσυστήματα και τις ανθρώπινες κοινωνίες και μαστίζει τον πολιτισμό σε όλη την ιστορία της. Μπορεί να επηρεάσει ένα ευρύ φάσμα τομέων, όπως τη γεωργία και τα οικοσυστήματα, με διαφορετικές γεωγραφικές και χρονικές κατανομές. Εκτιμάται ότι το πρόβλημα της επάρκειας του νερού στη γεωργία θα εντείνεται στο μέλλον, τόσο λόγω του ενδεχόμενου περιορισμού των βροχοπτώσεων, όσο και εξαιτίας της αύξησης των θερμοκρασιών (Jones et al., 2005). Είναι συνέπεια της φυσικής μείωσης του ποσοστού κατακρήμνισης που λαμβάνει χώρα σε μια εκτεταμένη περίοδο του χρόνου, συνήθως σε μία εποχή ή περισσότερο, παρόλα αυτά συχνά συμβάλουν και άλλοι κλιματικοί παράγοντες (όπως οι υψηλές θερμοκρασίες, ισχυροί άνεμοι και χαμηλή σχετική υγρασία) και επιδεινώνουν τη σοβαρότητα του φαινομένου (Oblack, 2015). Λόγω της πολυπλοκότητας, είναι δύσκολο να δοθεί ένας συγκεκριμένος ορισμός. Από τη μέση σχεδόν του 20ού αιώνα η επιστημονική κοινότητα έχει εκφράσει τις δυσκολίες σχετικά με τη διατύπωση ενός επαρκούς ορισμού για την περιγραφή του φαινομένου (Palmer, 1965). Σήμερα υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τη συγκεκριμένη έννοια, με κοινό παρονομαστή όλων αυτών το ότι η ξηρασία χαρακτηρίζεται από ανεπαρκή υγρασία λόγω έλλειψης βροχοπτώσεων για μια περίοδο.

Η ξηρασία δεν πρέπει να συγχέεται με την ξηρότητα, που είναι ένα χαρακτηριστικό του κλίματος, το οποίο ορίζεται ως το μέσο έλλειμμα της βροχόπτωσης σε σχέση με τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή μιας περιοχής. Η ξηρότητα, σε αντίθεση με την ξηρασία, αποτελεί μόνιμο

χαρακτηριστικό ενός τόπου και δεν οδηγεί στην ερημοποίηση αν η χρήση των υδατικών και εδαφικών πόρων γίνεται με σύνεση ώστε να εξασφαλίζεται η αειφορία. Η ξηρασία πολλές φορές συνδέεται με μονιμότερα φαινόμενα λειψυδρίας σε μια περιοχή. Ωστόσο η λειψυδρία στις περισσότερες περιπτώσεις προέρχεται και από την επίδραση άλλων παραγόντων, όπως είναι η αύξηση της ζήτησης, η αλόγιστη χρήση υδατικών και εδαφικών πόρων, η ανεπαρκής διαχείριση, οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Η λειψυδρία και η ερημοποίηση δηλαδή είναι φαινόμενα σύνθετα που οφείλονται και σε ανθρωπογενείς αιτίες. Ιδιαίτερα για τις ξηρές και ημίξηρες συνθήκες της Μεσογείου, όπου τα συστήματα είναι περισσότερο ευάλωτα, η υπερβολική χρήση των πόρων οδηγεί στην υποβάθμιση και στην καταστροφή τους (Τσακίρης, 2000). Η ξηρασία παράγει ένα δίκτυο επιπτώσεων που μπορούν να είναι είτε άμεσες είτε έμμεσες σε οικονομικό, περιβαλλοντικό και κοινωνικό επίπεδο (NDCM, 2008).

Παραστατικότερα οι ξηρασίες βρίσκονται στο ένα άκρο μιας «τραμπάλας» και οι πλημμύρες στο άλλο. Εκδηλώνονται έντονα σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, όταν σε άλλες περιοχές εκδηλώνονται πλημμύρες. Η εμφάνιση του «διπόλου» ξηρασιών – πλημμύρων σε ετήσια ή σε διαφορετική χρονική κλίμακα είναι αναμενόμενη και φυσιολογική, αφού η εκδήλωση ισχυρών βροχοπτώσεων σε μια περιοχή συνεπάγεται την εκδήλωση ξηρασιών σε κάποιες άλλες περιοχές. Κατά συνέπεια κανένα έτος δεν μπορεί να είναι πολύ υγρό ή πολύ ξηρό για εκτεταμένες περιοχές, αφού η ποσότητα νερού που εξατμίζεται και πέφτει με περίσσεια σε ορισμένες περιοχές, σπανίζει σε άλλες. Η ξηρασία εμφανίζεται και επεκτείνεται βαθμιαία και ύπουλα και δίνει την εντύπωση μη ύπαρξης ενός συγκεκριμένου συμβάντος. Χαρακτηρίζεται ως κινητήριος δύναμη που έχει μόνο συνέπειες και ως σχετική και όχι απόλυτη έννοια. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν την ξηρασία ένα πολύ επικίνδυνο ακραίο κλιματικό φαινόμενο (Μπαλούτσος κ.ά., 2006).

1.1.2 Τύποι ξηρασίας

Η ξηρασία έχει πολλαπλές πτυχές και μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις βασικούς τύπους, την μετεωρολογική ξηρασία, την γεωργική ξηρασία, την υδρολογική ξηρασία, και την κοινωνικό-οικονομική ξηρασία (Dracup et al., 1980),(Heim, 2002).

Η μετεωρολογική ορίζεται με βάση την απόκλιση της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, αριθμός ημερών βροχής) από την αναμενόμενη, με βάση το κλίμα της περιοχής. Συνδέεται άμεσα με την συγκεκριμένη περιοχή στην οποία παρουσιάζεται, αφού εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι οποίες μεταβάλλονται έντονα από περιοχή σε περιοχή (WMO, 2006).

Η γεωργική ξηρασία που ορίζεται με βάση τις επιδράσεις που έχει η μετεωρολογική ξηρασία στη γεωργία είναι πάντα αποτέλεσμα της ανεπάρκειας της εδαφικής υγρασίας να καλύψει τις ανάγκες διαπνοής των φυτών, ώστε να ξεκινήσει ή να συνεχιστεί η ανάπτυξη τους. Οι ανάγκες σε νερό των φυτών εξαρτάται από τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες, τα βιολογικά χαρακτηριστικά κάθε είδους, το στάδιο της ανάπτυξης που βρίσκονται και τις φυσικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους. Η κύρια παράμετρος που εξετάζεται είναι η διαφορά μεταξύ βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Η υδρολογική ξηρασία σχετίζεται με τα αποτελέσματα της μειωμένης βροχόπτωσης στην επιφανειακή και υπόγεια απορροή του νερού και εκδηλώνεται με τη μείωση της εδαφικής

υγρασίας, της παροχής των ποταμών και πηγών, της στάθμης λιμνών και ταμιευτήρων και των αποθεμάτων των υπόγειων νερών (Mishra et al., 2010).

Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία ουσιαστικά εκφράζει την τρωτότητα (vulnerability) της κοινωνίας στην έλλειψη νερού. Συνδέει όλες τις προηγούμενες παραμέτρους με την προσφορά και ζήτηση αγαθών που σχετίζονται με τη χρήση νερού, όπως το πόσιμο νερό, τα γεωργικά προϊόντα και η υδροηλεκτρική ενέργεια. Η κοινωνικοοικονομική ξηρασία υδατικών συστημάτων λαμβάνει χώρα, όταν η ζήτηση γι' αυτά τα αγαθά ξεπερνά την προσφορά ως αποτέλεσμα της έλλειψης νερού, όμως η εμφάνισή της εξαρτάται σημαντικά και από τις κοινωνικές και οικονομικές διαδικασίες προσφοράς και ζήτησης των παραπάνω αγαθών. Ακόμη μπορεί να προκληθεί και μέσα από πολιτικές διαδικασίες, όπως οι διαμάχες μεταξύ κρατών και κοινωνικών ομάδων για τη χρήση του νερού ή τη μετακίνηση πληθυσμών σε άνυδρες περιοχές (Iglesias et al., 2007a). Η συχνότητα εμφάνισης της γεωργικής, της υδρολογικής και της κοινωνικοοικονομικής ξηρασίας είναι πολύ μικρότερη από ότι της μετεωρολογικής.

Βασική αιτία εκδήλωσης μιας ξηρασίας είναι η φυσική διακύμανση του κλίματος ενός τόπου. Ο όρος αυτός φανεώνει το «κληρονομικό» γνώρισμα του κλίματος να παρουσιάζει συχνά διαφορές μεταξύ των ημερήσιων, μηνιαίων ετήσιων τιμών της βροχής, θερμοκρασίας και των αντίστοιχων μέσων τιμών τους. Οι διαφορές αυτές των καιρικών παραμέτρων μπορεί να είναι μία, δύο ή περισσότερες φορές μεγαλύτερες ή μικρότερες από το μέσο όρο. Η διακύμανση του κλίματος οφείλεται στη μείωση ή αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας (θερμότητας) που δέχεται κάθε τόπος στον πλανήτη τις διάφορες εποχές. Η αυξομείωση της θερμότητας με τη σειρά της επιφέρει αλλαγές στις «κανονικές κατευθύνσεις των αερίων μαζών ή τις μπλοκάρει» και διαταράσσει τον καιρό και το κλίμα. Προστίθεται ακόμα πως η μεταβολή της θερμότητας από τον ήλιο προς τη γη οφείλεται σε αιτίες που απορρέουν από τον ίδιο, καθώς και από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια της γης (καταστροφές των δασών από πυρκαγιές, αποψίλωση, απερήμωση). Οι παραπάνω αιτίες εκδήλωσης ξηρασίας καθιστούν προφανώς πολύ δύσκολη την πρόγνυσή της (Μπαλούτσος κ.ά., 2006).

1.1.3 Παράγοντες εκτίμησης της ξηρασίας

Προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος μιας ξηρασίας λαμβάνονται υπόψη οι παράγοντες της έντασης, της χρονικής διάρκειας, της γεωγραφικής έκτασης και της καταστροφικότητας. Η ένταση (δριμύτητα) της ξηρασίας συναρτάται με την απόκλιση της βροχόπτωσης και άλλων παραμέτρων που συνδέονται με την εξάτμιση (θερμοκρασία, άνεμος, υγρασία) από τις αναμενόμενες κλιματικές τιμές. Η χρονική διάρκεια είναι δύσκολο να προσδιοριστεί αφού υπάρχει αβεβαιότητα για τη χρονική στιγμή αρχής και τέλους του φαινομένου. Εξελίσσεται αργά και επιδρά αθροιστικά ενώ οι επιδράσεις συνεχίζονται και μετά την έναρξη της βροχόπτωσης.

Η γεωγραφική έκταση κάθε ξηρασίας συναρτάται άμεσα με τα μετεωρολογικά και κλιματικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής αλλά και τα υπάρχοντα έργα μεταφοράς νερού. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση υδατικών συστημάτων που τροφοδοτούνται με νερό από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές οι οποίες απέχουν σημαντικά μεταξύ τους. Στα συστήματα αυτά, η γεωγραφική έκταση της ξηρασίας είναι παράμετρος ιδιαίτερα σημαντική, αφού μπορεί να επηρεάσει μόνο ένα τμήμα των υδατικών πόρων.

Η καταστροφικότητα εκφράζει την επίδραση του φυσικού φαινομένου στις ανθρώπινες δραστηριότητες. Εξαρτάται από την ένταση, τη διάρκεια και την έκταση της ξηρασίας, τη χρονική κατανομή της βροχής, τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων και την εξέλιξη της ζήτησης. Έτσι η εκδήλωση των βροχών σε σχέση με τα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών, ο αριθμός των επεισοδίων βροχής και η ένταση τους, η παρουσία τεχνητών ταμιευτήρων και η δυνατότητα μείωσης των υδατικών αναγκών, συνδέονται με την αποτελεσματικότητα της βροχής να καλύψει τις ανθρώπινες ανάγκες και κατά συνέπεια με την καταστροφικότητα της ξηρασίας (Μαμάσης και Κουτσογιάννης, 2007), (Yevjevich, 1967), (Μαμάσης, 1997), (Palmer, 1965), (Twomey, 1959).

1.1.4 Μεσογειακό κλίμα και ξηρασία

Το κλίμα της Μεσογείου επηρεάζεται από το υποτροπικό υψηλό της ξηρής ζώνης των ερήμων της Βόρειας Αφρικής, από τους δυτικούς ανέμους της κεντρικής και βόρειας Ευρώπης, από τους αφρικο-ασιατικούς μουσώνες το υψηλό σύστημα πιέσεων της Σιβηρίας, και την ταλάντωση του Βορείου Ατλαντικού (North Atlantic Oscillation/NAO) και του νότιου ωκεανού South Oscillation (SO), (Lionello and Galati, 2008).

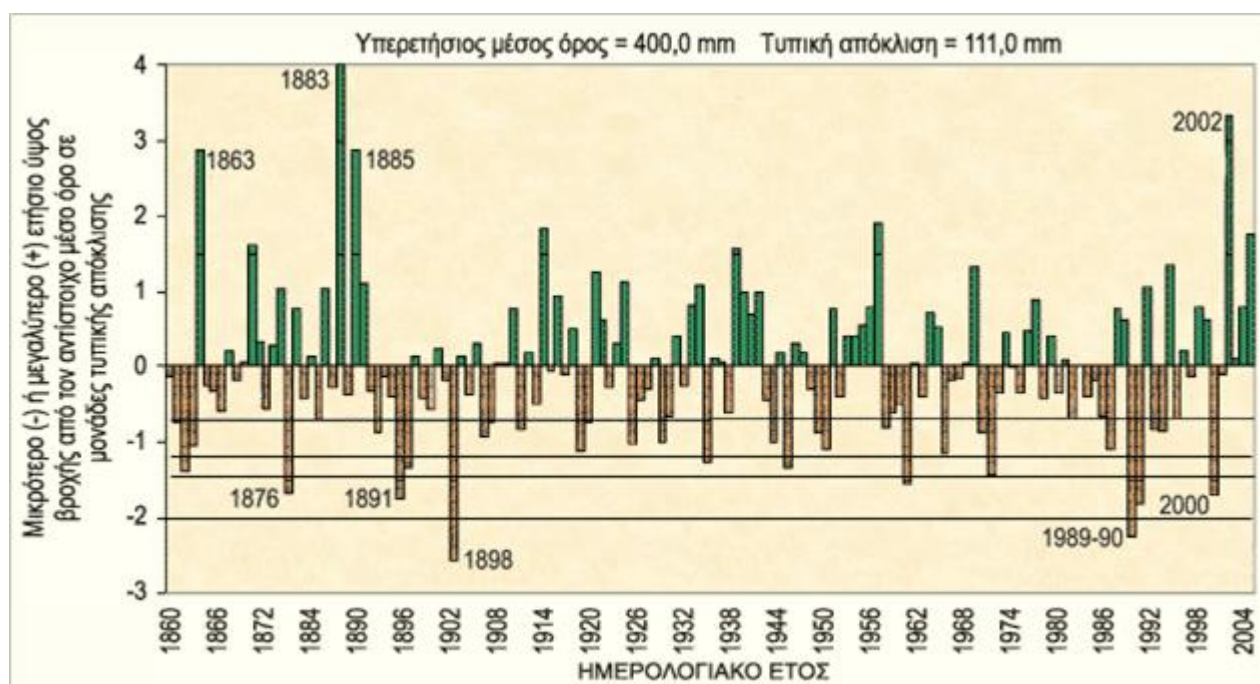
Στο ευρωπαϊκό έδαφος αν και αναμένονται ισχυρά φαινόμενα μια φορά κάθε πενήντα χρόνια, σημαντική έλλειψη νερού σε τμήματα ευρωπαϊκού χώρου εμφανίζεται κάθε 5 χρόνια με διάρκεια που πολλές φορές ξεπερνά τον ένα χρόνο. Στην Ελλάδα, που κατατάσσεται στο Μεσογειακό τύπο κλίματος, η ετήσια βροχόπτωση σ' ορισμένες περιοχές ξεπερνά τα 2000mm, ενώ στις υπήνεμες περιοχές και στις Κυκλάδες μπορεί να είναι μικρότερη από 350 mm. Ακόμα και στους ορεινούς όγκους της Κρήτης, η βροχόπτωση υπερβαίνει τα 1800 mm. Η θερινή βροχόπτωση είναι μηδαμινή ή ανεπαρκής, κυρίως στις νότιες περιοχές. Στις ηπειρωτικές βόρειες περιοχές οι θερινές βροχοπτώσεις είναι περισσότερες και οφείλονται στις καταιγίδες που δημιουργούνται όταν υπάρχει αστάθεια στην ατμόσφαιρα. Έτσι κατά το θέρος το έδαφος ξηραίνεται και παρουσιάζει έλλειμμα υδατικού περιεχομένου (Φλόκας, 1997).

Αξίζει να σημειωθεί ότι φαινόμενα ξηρασίας υπήρχαν πάντα στο πέρασμα του χρόνου. Αξιοσημείωτης έντασης θεωρούνται γεγονότα της ξηρασίας όπως του 1987-88 έως το 1992-93, στην Ελλάδα, του 1988-90 στην Ιταλία και του 1990-96 στην Ισπανία. Τα τελευταία 40 χρόνια η ιβηρική χερσόνησος και ιδιαίτερα το νοτιοανατολικό της μέρος, δοκιμάστηκε από παρατεταμένες περιόδους κάτω του κανονικού ύψους βροχόπτωσης. Το επεισόδιο της ξηρασίας, που συνέβη κοντά στα νότια το 1990, ήταν ένα από τα μεγαλύτερα και πιο έντονα των τελευταίων 65 ετών (Merayo et al., 1997). Στην Ελλάδα η ξηρασία του 2001-2002 προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές στον αγροτικό τομέα, καταστρέφοντας σημαντικές εκτάσεις καλλιεργειών σε 29 νομούς. Ειδικότερα στη Θεσσαλία, περισσότερα από 40 Km² βαμβακοκαλλιεργειών καταστράφηκαν ολόκληρα οικοσυστήματα λιμνών και ποταμών απειλήθηκαν με εξαφάνιση και υπήρξε μεγάλη πτώση της στάθμης των γεωτρήσεων (Μιμίκου και Φωτόπουλος, 2004).

Η Ελλάδα λόγω της γεωγραφικής της θέσης στον πλανήτη είναι επιρρεπής στην εκδήλωση συχνών ξηρασιών. Οι πρώτες γραπτές πληροφορίες για την εκδήλωση ξηρασιών προέρχονται από κείμενα των αρχαίων ιστορικών. Στα κείμενα αυτά οι ξηρασίες συνήθως αναφέρονται ως σοβαρά εμπόδια στην εξέλιξη πολεμικών επιχειρήσεων. Αναφορές όμως για την εκδήλωση ξηρασιών στην Ελλάδα υπάρχουν επίσης και σε κείμενα όλων των μετέπειτα χρονικών περιόδων. Άλλη έμμεση πληροφορία για την εκδήλωση ξηρασιών στη Ελλάδα στο παρελθόν είναι οι δενδροχρονολογικές

σειρές που έχουν καταρτισθεί από διάφορους κλιματολόγους και μετεωρολόγους (Μπαλούτσος κ.ά., 2006).

Στο Διάγραμμα 1.1 φαίνεται η κατανομή των 145 ετών σε ξηρά (καφέ) και υγρά (πράσινα) από δημοσιευμένα στοιχεία βροχής του Αστεροσκοπείου Αθηνών. Αναλυτικότερα, κάθε στήλη του διαγράμματος δείχνει πόσο μικρότερο ή μεγαλύτερο από το μέσο όρο (400 mm) σε μονάδες τυπικής απόκλισης (111 mm) είναι το ύψος βροχής του έτους που αντιπροσωπεύει. Θεωρητικά από τα 145 έτη, τα 77 θα μπορούσαν να χαρακτηρισθούν ως ξηρά και τα 68 ως υγρά. Όμως είναι γνωστό πως μία χρονιά αρχίζει να θεωρείται ως ξηρή αν το ύψος βροχής της είναι μικρότερο από το μέσο όρο κατά 0.5 έως 0.7 τυπικές αποκλίσεις (τ.α.). Με την αύξηση της διαφοράς αυτής μία ξηρασία θεωρείται ως μέτρια (διαφορά 0.8-1.2 τ.α.), ως ισχυρή (διαφορά 1.3-1.5 τ.α.), ως πολύ ισχυρή (διαφορά 1.5-1.9 τ.α.) και ως εξαιρετικά ισχυρή (διαφορά μεγαλύτερη από 2 τ.α.).



Διάγραμμα 1.1: Διαδοχή ξηρών και υγρών ετών στην Αττική την περίοδο 1860-2005 (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Σύμφωνα με το διάγραμμα διαπιστώνεται πως τουλάχιστον η περιοχή της Αττικής κατά την περίοδο 1860 – 2005 επλήγη από 19 μέτριες ξηρασίες, 5 ισχυρές, 5 πολύ ισχυρές και 2 εξαιρετικά ισχυρές. Οι ξηρασίες που αναφέρθηκαν εκδηλώθηκαν ανά ακαθόριστα έτη και δεν φαίνεται να είχαν κάποια περιοδικότητα. Εξαιρέση αποτέλεσαν μόνο η διετής ξηρασία του 1989-90 και εκείνη του 2000 που συνέπεσαν με το μέγιστο αριθμό ηλιακών κηλίδων οι οποίες επηρεάζουν την ακτινοβολία προς τη γη (Μπαλούτσος κ.ά., 2006).

Το Αύγουστο του 2007, όπως και τον Αύγουστο του 2009, η Ελλάδα βίωσε δύο υπερ-πυρκαγιές: η μία στην Ηλεία και η άλλη στην Αττική. Και στις δύο περιπτώσεις μέσα σε λίγες μόλις ώρες η φωτιά πήρε ανεξέλεγκτες διαστάσεις κατακαίγοντας εκατοντάδες χιλιάδες στρέμματα δάσους, καλλιεργήσιμων εκτάσεων. Ο καύσωνας, η ξηρασία του εδάφους και οι ισχυροί άνεμοι –έκαναν μια απλή πυρκαγιά να λάβει ανεξέλεγκτες διαστάσεις και κανείς να μην μπορεί να τη σταματήσει.

Τέτοιες υπερ-πυρκαγιές δεν αποτελούν ατυχή περιστατικά αλλά την εικόνα ενός ζοφερού μέλλοντος που έρχεται αν η ξηρασία ενταθεί λόγω του «Φαινομένου του Θερμοκηπίου» (Στάμκος, 2015).

1.1.5 Δάση, ξηρασία και κλιματική αλλαγή

Στη Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Μεταβολές (UNFCCC), η κλιματική αλλαγή ορίζεται ειδικότερα ως η μεταβολή στο κλίμα που οφείλεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινες δραστηριότητες, διακρίνοντας τον όρο από την κλιματική μεταβλητότητα που έχει φυσικά αίτια (United Nations, 1992).

Σύμφωνα με την τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης (AR4) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC, 2013), η οποία ιδρύθηκε από τον ΟΗΕ (UNEP) και τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό και αποτελεί τον κορυφαίο διεθνή οργανισμό για την αξιολόγηση της αλλαγής του κλίματος, «η αύξηση της θερμοκρασίας του κλιματικού συστήματος είναι αδιαμφισβήτητη», και η πιθανότητα αυτό να οφείλεται στον ανθρώπινο παράγοντα, εξαιτίας των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, είναι μεγαλύτερη από 90%. Σύμφωνα με την ίδια έκθεση, χωρίς δραστικές μειώσεις των εκπομπών, η μέση πλανητική θερμοκρασία θα αυξηθεί ως το τέλος του αιώνα κατά 1,7°C έως 7°C, σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, ανάλογα με το ρυθμό μεταβολής των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Οι τωρινές εκπομπές βρίσκονται στην κορυφή των προβλεπόμενων εκτιμήσεων και αν δεν αναληφθούν δράσεις θα επιφέρουν, πιθανότατα, αυξήσεις της θερμοκρασίας στο ανώτερο εύρος των προβλέψεων (Bernstein et al., 2007).

Η πιο άμεση και ραγδαία επίπτωση της κλιματικής αλλαγής στα μεσογειακά δάση αφορά στις δασικές πυρκαγιές καθώς τα κλιματικά μοντέλα προβλέπουν ένταση της ξηρασίας στη Μεσόγειο εντός του 21^{ου} αιώνα. Η αύξηση της συχνότητας και της έντασης των πυρκαγιών, καθώς και της έκτασης των καμένων εκτάσεων, ευνοείται από τις συνθήκες ξηρασίας, τις παρατεταμένες περιόδους υψηλών θερμοκρασιών και τα ακραία καιρικά φαινόμενα - συνθήκες που παρατηρούνται κυρίως στις βορειότερες περιοχές της Μεσογείου (Πορτογαλία, Ελλάδα, Ιταλία, Ισπανία).

Η ξηρασία, όμως, θα μειώσει και την παραγωγικότητα στα ευαίσθητα είδη, ενώ τα είδη που είναι ανθεκτικότερα στις ξηροθερμικές συνθήκες θα υποστούν μικρότερες συνέπειες. Τέτοιες συνθήκες αναμένεται να επηρεάσουν το δυναμικό αναγέννηση και τη σύνθεση των δασών. Η κατανομή των ειδών θα μεταβληθεί και οι βιοκλιματικοί θύλακες (συνθήκες στις οποίες κάποιο είδος μεγαλώνει άριστα) θα μετακινηθούν βόρεια ή σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Εξαιτίας της μεταβολής των θερμοκρασιών, της μείωσης της εδαφικής υγρασίας και της αύξησης του CO₂, ο ανταγωνισμός μεταξύ των ειδών αναμένεται να μεταβληθεί και να έχει ως συνέπεια την μείωση της βιοποικιλότητας στα μεσογειακά οικοσυστήματα. Η αλλαγή του δυναμικού του ανταγωνισμού των ειδών, θα επηρεάσει σημαντικά τις μικτές συστάδες και τα φυσικά οικοσυστήματα. Κατά τα επόμενα χρόνια θα επηρεαστούν τα φυσικά όρια εξάπλωσης των δασικών ειδών, καθώς αλλάζουν τα θερμότερα και ξηρότερα όρια εξάπλωσής των. Μελλοντικά αναμένεται να παρατηρηθεί μετανάστευση ειδών. Η δασική πέυκη πιθανόν να εκλείψει από τις νοτιότερες περιοχές εξάπλωσής της. Η οξιά και άλλα πλατύφυλλα είδη θα μετακινηθούν βορειότερα ενώ τα Δασο-όρια αναμένεται να μετακινηθούν σε μεγαλύτερα υψόμετρα (Ραδόγλου, 2014).

Το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου είναι μακράν το CO₂, και στην Ελλάδα, όπως καταγράφεται επισήμως στις εθνικές ετήσιες αναφορές προς τα Ηνωμένα Έθνη. Συμμετέχει στις εθνικές εκπομπές κατά περίπου 85% σε σχέση με τα άλλα αέρια. Ο τομέας της ενέργειας (έκλυση ενέργειας από καύσεις) που περιλαμβάνει βιομηχανίες, μεταφορές και οικιακούς καταναλωτές είναι αυτός που συνεισφέρει περισσότερο στις εθνικές εκπομπές (80% περίπου). Τα δάση είναι ο τομέας που απορροφά, έχει δηλαδή αρνητικό πρόσημο στις εκπομπές και είναι ένας φυσικός τρόπος απορρόφησης. Παρατηρούμε ότι τις χρονιές με μεγάλες φωτιές (2000 και 2007) η απορροφητική ικανότητα των δασών μειώθηκε σημαντικά (Υπ.Γεωργίας, Γ.Γ.Δασών & Φυσ.Περιβάλλοντος, 2000).

Σύμφωνα με το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (2015) για την Ελλάδα αναμένονται τα εξής:

- Αύξηση κατά 50% των θερμών ημερών για την περίοδο 2021-2050 και 100% μεταξύ 2071-2100.
- Οι κατά μέσο όρο 6,7 ημέρες καύσωνα της περιόδου αναφοράς 1961-1990 προβλέπεται να διπλασιαστούν (12,8 ημ.) την περίοδο 2021-2050 και να πενταπλασιαστούν (30,50 ημ.) την περίοδο 2071-2100.
- Προβλέπονται 30 επιπλέον ημέρες αυξημένου κινδύνου πυρκαγιάς ανά έτος, οι οποίες θα παρουσιαστούν κυρίως στις ανατολικές περιοχές της χώρας, από τη Θράκη μέχρι και την Κρήτη.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας φαίνεται να συνοδεύεται από αύξηση των ξηρών ημερών. Οι περιοχές που θα επηρεαστούν περισσότερο είναι η Ανατολική Στερεά, η Εύβοια, η Θεσσαλία, καθώς και τα νησιά του Αιγαίου και η Κρήτη.

Τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα δάση μαρτυρούν επίσης οι μαζικές ξηράνσεις πεύκων (Νομός Ηλείας) ή ελάτων (Χελμός, Όρος Γκιώνα) εξαιτίας διαφόρων παραγόντων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, με αποτέλεσμα την εισβολή εντόμων (ΕΘΙΑΓΕ, 2014).

Συνεπώς, ενώ τα δάση διατηρούν σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, αμβλύνοντας τις επιπτώσεις της παράλληλα πλήττονται από αυτήν με αποτέλεσμα να μπαίνουν σε κίνδυνο και οι υπηρεσίες που προσφέρουν. Τα δάση έχουν ιδιαίτερη οικολογική, αισθητική και οικονομική αξία. Προσφέρουν ξυλεία για την κατασκευή κατοικιών, βιομάζα για καύσιμα, ξύλα, πολύ για χαρτί, φάρμακα και πολλά άλλα προϊόντα. Επίσης μεγάλο μέρος της έκτασης των δασών χρησιμοποιείται για εξορύξεις, βοσκή ζώων και αναψυχή. Οι δασώδεις λεκάνες απορροής, λειτουργούν ως γιγάντια σφουγγάρια. Επιβραδύνουν τις απορροές και συγκρατούν νερό που ανατροφοδοτεί τα ποτάμια και τα υπόγεια ύδατα. Έτσι ρυθμίζουν τη ροή του νερού από τα ορεινά υψίπεδα στις καλλιεργούμενες εκτάσεις και τις αστικές περιοχές. Επιπλέον ελαττώνουν τη διάβρωση του εδάφους. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η ποσότητα των ιζημάτων που παρασύρεται σε ποτάμια, λίμνες και δεξαμενές. Τα δάση επηρεάζουν σημαντικά το κλίμα. Είναι ζωτικής σημασίας για τον κύκλο του άνθρακα στον πλανήτη. Περίπου το μισό διοξείδιο που παράγεται, καταλήγει στους ωκεανούς ή απορροφάται από τα δάση. Μια νέα αμερικανική επιστημονική μελέτη απόδειξε ότι τα δέντρα και όλα τα φυτά απορροφούν 16% περισσότερο διοξείδιο από ό,τι υπολογιζόταν έως τώρα. Επιπλέον παρέχουν βιότοπους για τα περισσότερα είδη άγριας ζωής και λειτουργούν ως προστατευτική ασπίδα κατά του θορύβου. Παράλληλα απορροφούν τους αέριους ρυπαντές και ανανεώνουν το ανθρώπινο πνεύμα (Miller, 2009).

Ένα τυπικό δένδρο προσφέρει κατά μέσο όρο οικολογικά οφέλη αξίας 146.182 ευρώ περίπου κατά την διάρκεια της ζωής του, με την μορφή των όσων αναφέρθηκαν προηγουμένως, με την παροχή οξυγόνου, καθαρισμού του αέρα κ.α. Αν το τυπικό δένδρο κοπεί και πωληθεί ως απλή ξυλεία αξίζει μόνο 439 ευρώ περίπου. Είναι πασιφανές ότι τα μακροπρόθεσμα οικολογικά οφέλη από ένα δένδρο συγκρινόμενα με τα βραχυπρόθεσμα οικονομικά οφέλη, υπερисχύουν κατά 99.7% των βραχυπρόθεσμων που αποτελούν μόνο το 0.3% και υποκύπτουν παράλληλα σε συνεχείς υποτιμήσεις στην αξία τους σύμφωνα με τις τελευταίες τάσεις της παγκόσμιας αγοράς (Miller, 2009).

Τα τελευταία 30 χρόνια, σε κάθε ήπειρο που διαθέτει δάση σημειώθηκε μια εκτεταμένη ξηρασία που είχε αποτέλεσμα τον θάνατο δεκάδων χιλιάδων δέντρων. Η γεωγραφική κλίμακα των ξηρασιών και η διάρκειά τους σε ολόκληρες ηπείρους σημαίνει συναγερμό στους οικολογικούς κύκλους (Σαράντης, 2013).

Στην ανατολική ακτή της Αυστραλίας είχαμε μια επταετή ξηρασία κατά την πρώτη δεκαετία αυτού του αιώνα. Οι περισσότερες χώρες της Δυτικής Ευρώπης βρέθηκαν αντιμέτωπες με την ξηρασία του 2003, όπου ο αριθμός των νεκρών από τους συναφείς καύσωνες ανήλθε σε 70.000. Οι απώλειες στις καλλιέργειες αλλά και σε ό,τι αφορά τη θνησιμότητα των δασών ήταν εκτεταμένες, ιδιαίτερα στη Νότια Ευρώπη, όπου χάθηκαν περισσότερα από 500.000 εκτάρια δάσους.

Οι μεσοδυτικές και οι νοτιοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής επίσης πρόσφατα αντιμετωπίζουν μια «εξαιρετική ξηρασία» (μια κλάση πάνω από την «ακραία ξηρασία»), γεγονός που προκαλεί την ευρεία θνησιμότητα των δέντρων και την αύξηση της δριμύτητας των πυρκαγιών σε ολόκληρη την περιοχή. Αλλά και τα δάση στην Ασία και τη Νότια Αμερική έχουν βιώσει περιοδική ξηρασία που επιφέρει τον θάνατό τους και αυξημένη συχνότητα πυρκαγιών μέσα στις τελευταίες δεκαετίες.

Όταν τα δάση πεθαίνουν οι τοπικές θερμοκρασίες ανεβαίνουν και όταν συμβαίνει αυτό σε μια αρκετά μεγάλη κλίμακα μεταβάλλει τις καιρικές συνθήκες. Ο τρόπος με τον οποίο οι λεκάνες του νερού επαναφορτίζουν τις ροές των χειμάρρων και των υπόγειων υδάτων μεταβάλλεται για πολλές δεκαετίες μετά την ξηρασία.

Η απώλεια της δασικής κάλυψης σε τεράστιες περιοχές αυξάνει τη διάβρωση του εδάφους από τον άνεμο αλλά και από τη βροχή όταν έρχεται τελικά. Τα δάση παρέχουν πολλές υπηρεσίες οικοσυστήματος: το ξύλο, την επικοινωνία, τη σταθερότητα του εδάφους, τη διατήρηση της βιοποικιλότητας και τον καθαρισμό του νερού. Η απώλεια τεράστιων εκτάσεων δασών είναι επιζήμια για τους ανθρώπους όσο και για την υγεία των οικοσυστημάτων.

Κατά τη διάρκεια μιας ξηρασίας οι θερμοκρασίες ανεβαίνουν, εξαιτίας της μειωμένης νέφωσης και της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία του εδάφους. Και όλο αυτό το φως του ήλιου που απορροφάται από τη βλάστηση και που θα έπρεπε κανονικά να χρησιμοποιείται για την εξάτμιση του νερού (ψύχοντας έτσι τον θόλο των δέντρων), δεν χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό. Πολλά είδη δέντρων κλείνουν τα στόματά τους για διατηρήσουν το νερό και, έτσι, σημειώνεται περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα.

Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας, που συμβαίνει κατά την ίδια χρονική περίοδο με την ξηρασία, έχει αναγνωριστεί κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών ως η κύρια αιτία της «παγκόσμιας αλλαγής του τύπου της θνησιμότητας των δασών» (Σαράντης, 2013).

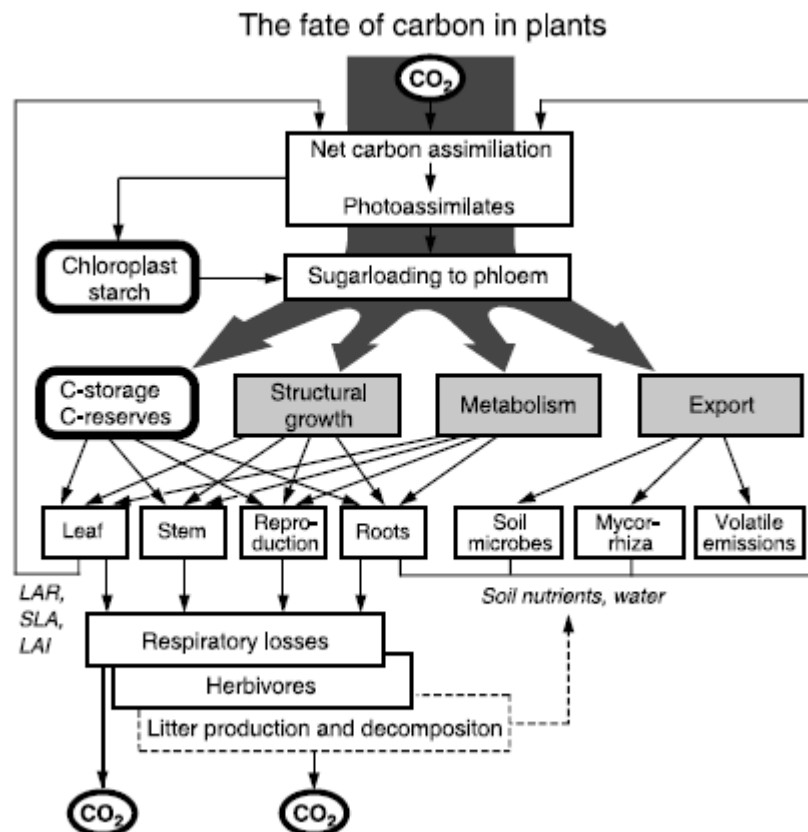
1.2 Η κίνηση του νερού και των προϊόντων της φωτοσύνθεσης εντός των φυτών

Η κίνηση του νερού εντός των φυτών είναι συνεχείς αλλά όχι ομοιόμορφη. Οι δυνατοί μηχανισμοί κίνησης του νερού είναι τρεις: η διάχυση, η μαζική ροή και η ώσμωση. Διάχυση είναι η τάση των μορίων μιας ουσίας να διασπείρονται από περιοχές υψηλότερης συγκέντρωσης προς τις περιοχές μικρότερης συγκέντρωσης. Η τάση αυτή εκδηλώνεται με αντίστοιχη μετακίνηση των μορίων. Ένας άλλος τρόπος μετακίνησης του νερού είναι μέσω της λεγόμενης μαζικής ροής, κατά την οποία νερό και διαλυμένες ουσίες κινούνται ταυτόχρονα προς μια κατεύθυνση εξαιτίας διαφορών πιέσεων. Η μετακίνηση του νερού (ή άλλου διαλύτη) δια μέσου μίας ημιπερατής μεμβράνης είναι γνωστή ως ώσμωση. Δηλαδή, ο διαλύτης κινείται, αυθόρμητα, μέσω μεμβράνης που είναι διαπερατή για τα μόριά του όχι όμως και για τα μόρια της διαλυμένης ουσίας και διαχωρίζει δύο διαλύματα διαφορετικών συγκεντρώσεων ή χωρίζει ένα διαλύτη από ένα διάλυμα και αποτελεί τον τρίτο τρόπο μετακίνησης του νερού, παράλληλα με τη διάχυση και τη μαζική ροή (Γαλάτης κ.ά., 2003), (Taiz et al., 2003).

Όμως, στην προσαρμογή τους στο περιβάλλον, τα φυτά έχουν αναπτύξει μηχανισμούς και κατασκευές που τα βοηθούν, να φτάνει το νερό και στα ακραία τμήματά τους (μερικές φορές και σε ύψος 100 μέτρων σε μερικά δένδρα), αλλά και στην εξοικονόμηση νερού.

Μεταξύ άλλων, τέτοιες κατασκευές είναι τα στόματα, που είναι μικροσκοπικές οπές-πόροι συνήθως στο κάτω μέρος των φύλλων (Κιτσάκης, 2008). Τα στόματα μπορούν να ανοίγουν και να κλείνουν με τη βοήθεια ειδικών κυττάρων, τα οποία ονομάζονται καταφρακτικά κύτταρα (Swarthour, 2012). Μέσω των στομάτων δεν εξέρχεται μόνο νερό αλλά επιτρέπεται η γενικότερη επικοινωνία του φυτού με το εξωτερικό περιβάλλον, καθώς από αυτά εισέρχεται διοξείδιο του άνθρακα προκειμένου να πραγματοποιηθεί η λειτουργία της φωτοσύνθεσης και εξέρχεται οξυγόνο, το οποίο αποτελεί προϊόν της (Κιτσάκης, 2008).

Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, παράγονται τα σάκχαρα και το άμυλο από μόρια γλυκόζης. Αυτές οι ουσίες διαλύονται επίσης στο νερό των φύλλων και μεταφέρονται σε όλα τα μέρη του φυτού για την αύξησή του, μέσα από ένα σύνολο αγγείων-στοιχείων ηθμού το φλοίωμα (phloem). Από εκεί και πέρα αυτά τα ενεργειακά μόρια μπορεί να αποθηκεύονται, να χρησιμοποιούνται για τις δομικές ανάγκες των φυτών, τον μεταβολισμό τους ή να εξάγονται εκτός των φυτών (Εικόνα 1.1).



Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της τύχης του άνθρακα στα φυτά (για επεξηγήσεις βλ. Körner, 2003)

Για να φτάσει το νερό στα φύλλα ακολουθεί την εξής διαδρομή. Μαζί με διάφορες διαλυμένες ουσίες που περιέχει κινείται ως υγρό μέσα στο έδαφος, απορροφάται από τη ρίζα, μεταφέρεται, με τη βοήθεια αγγείων-στοιχείων του ξύλου (ξύλωμα), μέσα από τον κορμό και τους βλαστούς, στα φύλλα (Hopkins, 1995), (Zeiger,1998), (Γαλάτης κ.ά., 2003).

Το ξύλωμα (xylem) είναι μια σειρά από αδρανείς σωλήνες-νεκρά κύτταρα και μεταφέρει το νερό από αρκετά μέτρα μέσα στη γη, έως την κορφή των δέντρων, με ταχύτητα που σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει τα 50 μέτρα την ώρα. Τα νεκρά και αδρανή κύτταρα του ξυλώματος μπορούν να ανεβάσουν εκατοντάδες λίτρα νερού τη μέρα σε μεγάλο ύψος, υπερνικώντας τη δύναμη της βαρύτητας.

1.3 Χαρακτηριστικά χαλεπίου πεύκης

Το γένος *Pinus* είναι το μεγαλύτερο και πιο σημαντικό γένος των κωνοφόρων. Απαρτίζεται από 95 είδη (Μίγον, 1967) με ευρύτατη εξάπλωση στο Βόρειο Ημισφαίριο. Τα πεύκα απαντούν σχεδόν σε όλες τις κλιματικές ζώνες και οικοσυστήματα, ενώ υψομετρικά απαντούν από την παραλιακή ζώνη μέχρι τα δασοόρια. Ορισμένα είδη εξαπλώνονται ευρύτατα, ενώ άλλα έχουν πολύ περιορισμένη φυσική κατανομή.

Η χαλέπιος πεύκη (*Pinus halepensis* Mill.) ή κοινό πεύκο είναι ένα είδος προσαρμοσμένο στις ακραίες κλιματικές και εδαφικές συνθήκες του Μεσογειακού. Αναπτύσσεται σε χαμηλό υψόμετρο,

μέχρι τα 1000 μέτρα. Προτιμά τις ξερές και ζεστές περιοχές και τα ασβεστολιθικά εδάφη που δεν συγκρατούν υγρασία καθότι είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στην ξηρασία, στην αλατότητα, στην ατμοσφαιρική μόλυνση και στις δύσκολες εδαφικές συνθήκες. Από το δέντρο αυτό συλλέγεται το ρετσίνι, που προστίθεται στο κρασί για τη δημιουργία της γνωστής ρετσίνας. Το ξύλο του είναι μέτριας ποιότητας. Ο βλαστός του χρησιμοποιείται στη βυρσοδεψία. Ο κορμός του έχει υπόλευκο - ασημί χρώμα όταν πρόκειται για νεαρό δένδρο, που γίνεται σκούρο και καστανοκόκκινο, με ομαλές πτυχώσεις όταν αυτό ωριμάζει. Τα φύλλα του έχουν βελονοειδή μορφή, φύονται σε δυάδες και φτάνουν σε μήκος 5-12 cm και σε πλάτος 1 mm. Βγάζει βλαστούς μικρού μεγέθους και καστανού χρώματος. Τα κουκουνάρια της χαλεπίου πεύκης είναι πολύ κωνικά, μήκους έως 12 cm και πλάτους έως 4 cm, με καμπυλοειδείς μίσχους (Θάνος, 2012), (Θυμάκης κ.ά., 2011).

Αποτελεί το κυρίαρχο είδος πεύκης της δυτικής και κεντρικής ζώνης των παραλίων της Μεσογείου. Μαζί με το συγγενικό είδος της τραχείας πεύκης (*Pinus brutia* Ten.) (ή υποείδος κατά άλλους ερευνητές), που την αντικαθιστά στην ανατολική ζώνη, συγκροτούν τα σημαντικότερα αλλά και περισσότερο ευπαθή δασικά οικοσυστήματα της Νότιας Ευρώπης, τα Μεσογειακά πευκοδάση. Ειδικότερα η *P. brutia* εξαπλώνεται στην Ανατολική περιοχή – Ανατ. Ελλάδα, Τουρκία, Κύπρο, Β. Συρία και Β. Λίβανο -, ενώ η *P. halepensis* στις υπόλοιπες παραμεσόγειες περιοχές, καθώς και στη ζώνη της ΒΔ Αφρικής (Μαρόκο) που βρέχεται από τον Ατλαντικό Ωκεανό. Η συνολική έκταση των δασών της χαλεπίου πεύκης στη Μεσογειακή λεκάνη υπολογίζεται σε 3,5 εκατ. εκτάρια, ενώ της τραχείας σε 4 εκατ. εκτάρια περίπου (Ντάφης, 1987).

Είναι αξιοσημείωτο μάλιστα, ότι η Ελλάδα είναι η μόνη χώρα στην οποία συναντώνται οι φυσικές κατανομές των δύο ειδών. Τα κυριότερα δάση χαλεπίου πεύκης στη Ελλάδα απαντούν στην Αττική (Κιθαιρώνας, Γεράνεια, Πατέρας, Πάρνηθα, Πεντέλη, Υμηττός), στα νησιά του Αργοσαρωνικού, στη βόρεια-βορειοδυτική και ανατολική Πελοπόννησο (Ηλεία, Αχαΐα, Κορινθία, Αργολίδα), στη Ζάκυνθο, στη Λευκάδα, στη Βοιωτία (παράλια προς Κορινθιακό και Ευβοϊκό κόλπο), στην παραλιακή ζώνη της Φθιώτιδας προς τον Ευβοϊκό κόλπο (Χλωμόν όρος, Καλλίδρομο), στη βόρεια και κεντρική Εύβοια, στις Β. Σποράδες, στη Χαλκιδική (Κασσάνδρα, Σιθωνία) και στο Άγιον Όρος (Άθως). Με βάση τα στοιχεία της πρώτης Εθνικής Απογραφής Δασών υπολογίζεται ότι τα δάση χαλεπίου πεύκης καταλαμβάνουν συνολική έκταση 370000 εκτάρια, δηλαδή περίπου το 11% του συνόλου των Ελληνικών δασών.



Εικόνα 1.2: Χαλέπιος πεύκη (Bryant, 2012)

1.4 Μηχανισμοί προσαρμογής χαλεπίου πεύκης στο μεσογειακό κλίμα

Το μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται από υγρούς, ήπιους χειμώνες και μεγάλα, θερμά, ξηρά καλοκαίρια. Το μεγαλύτερο μέρος των ετήσιων βροχοπτώσεων σημειώνεται το χειμώνα και οι μήνες ξηρασίας μπορεί να είναι πολλοί, με την εξαίρεση θερινών καταιγίδων. Λόγω της παρατεταμένης καλοκαιρινής ξηρασίας οι πυρκαγιές είναι, επίσης, χαρακτηριστικό φαινόμενο του μεσογειακού κλίματος.

Η φυσική αναγέννηση των Μεσογειακών πεύκων ενισχύεται από μηχανισμούς προσαρμογής των ειδών στη ξηρασία. Οι προσαρμογές αυτές αναφέρονται σε μηχανισμούς προστασίας των σπερμάτων, μεγιστοποίησης της διαθεσιμότητας σπόρων μετά την ξηρασία και μετά από φωτιά, αποτελεσματική και ομοιόμορφη διασπορά των σπόρων με τον άνεμο, ελαχιστοποίηση των καταστροφών μετά τη διασπορά και αριστοποίηση της βλάστησης των σπόρων (Thanos, 2000).

Οι σπόροι στα Μεσογειακά πεύκα είναι καλά προστατευμένα στους κώνους, οι οποίοι μετά τη ξηρασία ανοίγουν και έτσι διασπείρονται τα σπέρματα. Αυτός ο μηχανισμός προσαρμογής είναι γνωστός ως όψιμη βιωσιμότητα σπόρων και είναι χαρακτηριστικό της πεύκης και του κυπαρισσιού (Vogel et al., 1997). Κάθε χρόνο από τη χαλέπιο πεύκη ένας μεγάλος αριθμός σπόρων ωριμάζει αλλά ένα μεγάλο μέρος των κώνων παραμένει κλειστό και διατηρεί τη βιωσιμότητα του για μεγάλο

χρονικό διάστημα. Η χαλέπιος πεύκη διατηρεί το 40-80% των κόνων κλειστούς. Η διασπορά των σπόρων γίνεται με τους ανέμους και ενισχύεται από ανέπαφες ομάδες δέντρων και από παρακείμενες συστάδες. Λόγω του μικρού βάρους και σχήματος οι σπόροι της *P.halepensis* μπορούν να διασπαρθούν σε μεγάλη απόσταση. Η ηλικία αναπαραγωγής είναι μικρή. Παράγονται ώριμοι σπόροι σε ηλικία 8 ετών δέντρων χαλεπίου.

Τα πεύκα (είδη του γένους *Pinus*) είναι ξηρομορφικά φυτά. Τα φύλλα τους είναι βελονοειδή και οι απώλειες νερού περιορίζονται από μια παχιά κέρινη εφυμενίδα. Ο λόγος της επιφάνειας προς τον όγκο των φύλλων είναι μικρός, τα στόματα είναι βυθισμένα σε σχέση με την επιφάνεια του φύλλου και ο σκληρεγχυματικός ιστός είναι επαρκώς αναπτυγμένος για να εξασφαλίζει στιβαρότητα. Επίσης, έχουν πυκνό μεσόφυλλο με στενούς μεσοκυττάριους χώρους (Shields, 1950), (Fahn, 1990). Τα είδη του γένους *Pinus* εκτός από τα παραπάνω μορφολογικά χαρακτηριστικά για την αντιμετώπιση της ξηρασίας είναι, επίσης, ανθεκτικά σε αυτήν και λόγω 17 προσαρμογών της φυσιολογίας τους. Μπορούν να αντιμετωπίσουν την έλλειψη νερού με λιγότερες γι' αυτά επιπτώσεις από ότι τα πλατύφυλλα μεσόφυτα (Muelder et al., 1963).

Γενικά, αντοχή στην ξηρασία στα φυτά μπορεί να προέλθει είτε μέσω ανοχής στη συρρίκνωση του πρωτοπλάστη κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, είτε μέσω μηχανισμών που επιτρέπουν την αποφυγή αυτής της συρρίκνωσης και τη συνεπακόλουθη αποξήρανση των ιστών τους. Το γένος *Pinus* ανήκει στη δεύτερη κατηγορία και στα διάφορα είδη του υπάρχει μια ποικιλία μηχανισμών για την αντιμετώπιση της ξηρασίας. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται (Rundel and Yoder 1998): α) Η μεγάλη ικανότητα εξερεύνησης των υδατικών αποθεμάτων από το ριζικό σύστημα και η αποδοτική πρόσληψη του διαθέσιμου νερού. β) Η υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα των ριζών και του βλαστού ανά μονάδα φυλλικής επιφάνειας. γ) Η υψηλή αποδοτικότητα στην αξιοποίηση του προσλαμβανόμενου νερού, αλλά και η υψηλή ικανότητα αποθήκευσής του εντός του φυτού.

Ο (α) μηχανισμός επιτρέπει την επιβίωση ακόμη και σε περιόδους πολυετούς ξηρασίας και έχει να κάνει με την αξιοποίηση από τα δέντρα αυτά υδατικών αποθεμάτων από βαθύτερα εδαφικά στρώματα κατά τις περιόδους όπου η ξηρασία γίνεται εντονότερη γεγονός που αναδεικνύει την πολύ μεγάλη πλαστικότητα η αλλά και την ανάπτυξη βαθιού ριζικού συστήματος (Sarris et al., 2007). Ανάλογοι μηχανισμοί έχουν παρατηρηθεί και σε άλλα είδη που ευδοκιμούν σε Μεσογειακού τύπου οικοσυστήματα όπως στο *Quercus coccifera* (Rambal, 1984), καθώς και σε διάφορα είδη *Eucalyptus* (Talsma and Gardner, 1986).

2. Θνησιμότητα δασών - Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η θνησιμότητα-απονέκρωση των δέντρων ορίζεται στις δασικές απογραφές με το άθροισμα των νεκρών δέντρων κατά τοποθεσία, δασοπονικό είδος και διάφορους αιτιολογικούς παράγοντες. Αξιολογείται με απλά περιγραφικά στατιστικά. Οι διαθέσιμες πληροφορίες για τους δασολόγους τυπικά περιλαμβάνουν απώλειες σε ξυλώδη όγκο που οφείλονται σε θνησιμότητα, περιγραφικά στατιστικά των αιτιολογικών παραγόντων απονέκρωσης, χωρικό εντοπισμό της θνησιμότητας και τάσεις θνησιμότητας κατά δασοπονικό είδος (Leatherberry et al., 1990). Σήμερα, στις περισσότερες διαχειριστικές εκθέσεις χρησιμοποιείται αυτή η μεθοδολογία αξιολόγησης της θνησιμότητας (Mutch and Parsons, 1998).

Ιστορικά, η ανάλυση της απονέκρωσης των δένδρων σε βάθος προωθήθηκε με την κατάρτιση μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης για την ατομική θνησιμότητα του δέντρου, τεχνική η οποία εφαρμόστηκε περιορισμένα σε εθνικές δασικές απογραφές (Monserud and Sterba, 1999), (Fridman and Stahl, 2001) και ενδεχόμενα να είναι ανεπαρκής για έναν ευρύ προσδιορισμό της δυναμικής της θνησιμότητας (Eid and Tuhus, 2001). Παρόλο που η συγκέντρωση πληροφοριών με μεθόδους τηλεπισκόπησης και η ανάπτυξη των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών συνέβαλαν σημαντικά στην αξιολόγηση της δασικής θνησιμότητας, η βασική μεθοδολογία αξιολόγησης της δασικής θνησιμότητας εξελίσσεται με αργό ρυθμό (Hawkes, 2000). Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επιδεινώσει την εκδήλωση της θνησιμότητας. Ωστόσο η πρόβλεψη παραμένει δύσκολη λόγω των φυσιολογικών μηχανισμών που διέπουν την ανταπόκριση των δένδρων στη ξηρασία. Πολλαπλοί μηχανισμοί μπορεί να προκαλέσουν απονέκρωση των δασών.

Οι ερευνητές έκαναν μια συντονισμένη προσπάθεια τα τελευταία χρόνια για να τεκμηριώσουν τους θανάτους δέντρων σε όλο τον κόσμο. Με τα κλιματικά μοντέλα προβλέπουν αύξηση έως και 4 βαθμών Κελσίου, της θερμοκρασίας του πλανήτη τα επόμενα χρόνια και η επίπτωση του θερμότερου καιρού στα δάση είναι αντικείμενο διερεύνησης. Οι μελέτες που καταρτίζονται δείχνουν ότι τουλάχιστον ορισμένα από τα δασικά οικοσυστήματα του πλανήτη έχουν ήδη ανταποκριθεί στην αλλαγή του κλίματος και έχουν αυξήσει την ανησυχία ότι τα δάση μπορούν να γίνουν όλο και πιο ευάλωτα στην άνοδο της θερμοκρασίας, σε συνδυασμό με την ξηρασία (Allen et al., 2010). Αυτό υποδηλώνει περαιτέρω κινδύνους στη λειτουργία των δασικών οικοσυστημάτων και των υπηρεσιών που προσφέρουν, συμπεριλαμβανομένης της απώλειας του αποθηκευμένου άνθρακα των δασών και των συναφών ατμοσφαιρικών ανατροφοδοτήσεων.

2.1 Θεωρίες σχετικά με τη δασική θνησιμότητα

Κατά την Manion, (1991), τα φυτά μετά από μια σοβαρή ξηρασία σε συνδυασμό με μακροχρόνιο στρες κακής εδαφικής τοποθεσίας, οδηγούνται στη απονέκρωση και σε αυτό το αποτέλεσμα συμβάλλουν κι άλλοι παράγοντες όπως τα παθογόνα. Κατά τους Bossel (1986) και Mueller-Dumbois (1987) τα φυτά οδηγούνται σε ταχεία θνησιμότητα λόγω μιας ανισορροπίας μεταξύ πρόσληψη και κατανάλωσης άνθρακα. Ο McDowell (2008) επικεντρώνεται σε τρεις υποθέσεις αφήνοντας ανοιχτό το ενδεχόμενο για το ποιός από τους τρεις μηχανισμούς τελικά υπερτερεί. Οι μηχανισμοί αυτοί αφορούν τη μεγαλύτερη επικράτηση των εντόμων και ασθενειών σε ένα θερμότερο κόσμο, την ξήρανση των φυτών λόγω υδραυλικής κατάρρευσης λόγω της χαμηλής διαθεσιμότητας του νερού και ένα τρίτο μηχανισμό, όπου τα φυτά σταματούν να φωτοσυνθέτουν λόγω έλλειψης άνθρακα που συνεπάγεται με την έλλειψη ενεργειακών αποθεμάτων για τη συντήρηση του μεταβολισμού τους (McDowell et al., 2008).

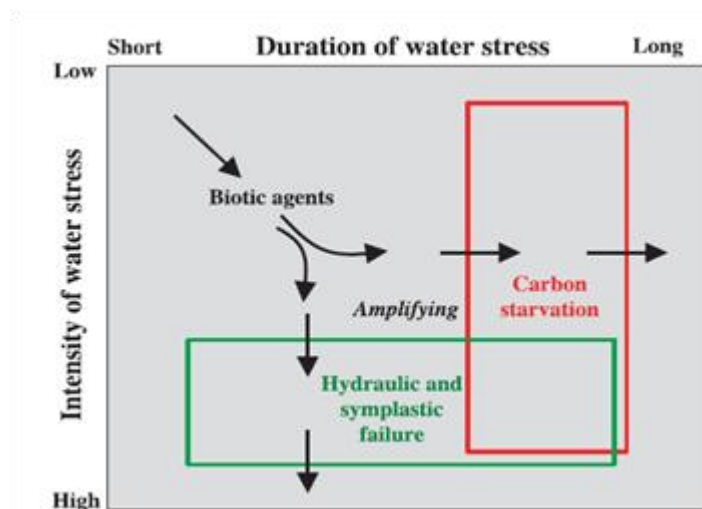
Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.1 οι τρεις μηχανισμοί σχετίζονται με την ένταση και τη διάρκεια της ανεπάρκειας του νερού. Κύριο ρόλο παίζουν οι βιοτικοί παράγοντες, δηλαδή τα έντομα και τα παθογόνα. Η περίοδος μιας ξηρασίας, «αποδυναμώνει» τα δέντρα και τα καθιστά πιο επιρρεπείς σε επιθέσεις εντόμων και παθογόνων (McDowell et al., 2008).

Η υπόθεση για υδραυλική κατάρρευση προβλέπει την μειωμένη εδαφική προμήθεια σε νερό σε συνδυασμό με την υψηλή ζήτηση με αποτέλεσμα τμήμα του υδραυλικού συστήματος των φυτών να υφίσταται εμβολή. Δηλαδή, λόγω φυσαλίδων αέρα που σχηματίζονται (σπηλαιώση) να συντελείται απόφραξη μεγάλου αριθμού αγγείων. Έτσι σταματά η ροή του νερού και ο φυτικός ιστός αποστεγνώνεται. Η πλήρη ξήρανση του οδηγεί σε κυτταρικό θάνατο. Η υδραυλική κατάρρευση είναι πιθανόν να συμβεί όταν η ξηρασία είναι αρκετά έντονη ώστε τα φυτά να ξεμείνουν από νερό, πριν εξαντληθούν τα αποθέματα του άνθρακα.

Η υπόθεση έλλειψης άνθρακα προβλέπει το κλείσιμο των στομάτων για πρόληψη από υδραυλική βλάβη. Αυτό έχει ως συνέπεια την μείωση της πρόσληψης του άνθρακα, με αποτέλεσμα την αναστολή της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Η υπόθεση αυτή είναι πιθανόν να συμβεί αν η ξηρασία δεν είναι αρκετά έντονη αλλά διαρκεί περισσότερο από τα αποθέματα άνθρακα στα φυτά. Και οι δύο υποθέσεις θα αναπτυχθούν αναλυτικά στην συνέχεια.

Οι βιοτικοί παράγοντες μπορούν να ενισχύσουν την υδραυλική κατάρρευση σταματώντας τη μεταφορά του νερού. Οι μύκητες προσβάλλουν τους ιστούς του δέντρου που μεταφέρουν τα υγρά του. Η προσβολή μπορεί να γίνει κατευθείαν στο φλοιό ή να εμφανιστεί βαθύτερα, στους ιστούς μεταφοράς υγρών (Larsson et al., 1983), (Waring and Pitman, 1985) , (Wullschleger et al., 2004). Επίσης οι βιοτικοί παράγοντες μπορούν να ενισχύσουν την έλλειψη ενεργειακών αποθεμάτων λόγω παραγωγής ρητίνης (Wallin et al., 2003). Η ρητίνη είναι ένα πυκνόρρευστο, κολλώδες, άχρωμο υγρό, η οποία καλύπτει την πληγή και προστατεύει το δένδρο από προσβολές σήψης και εντόμων. Η ροή της ρητίνης γίνεται μέσω των ρητινοφόρων αγωγών, οι οποίοι συνδέονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα «δίκτυο συγκοινωνούντων αγγείων» (Υπουργείο Παραγωγικής

Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2015). Οι τρεις μηχανισμοί μπορεί να λειτουργήσουν είτε σε συνδυασμό είτε μεμονωμένα.



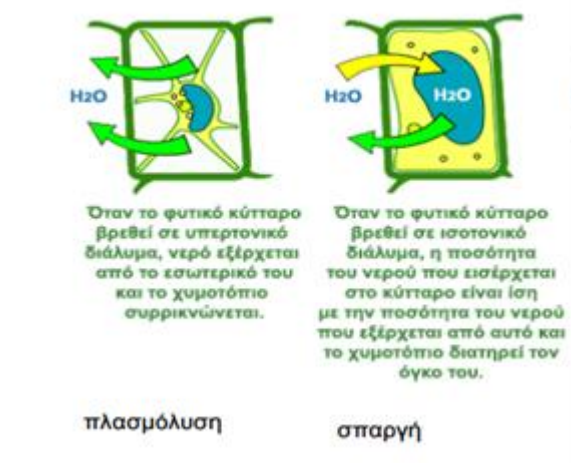
Εικόνα 2.1: Μηχανισμοί που οδηγούν τα δένδρα σε θνησιμότητα (McDowell et al., 2008)

2.1.1 Απονέκρωση δένδρων λόγω σπηλαίωσης του ξυλώματος και πλασμόλυσης των κυττάρων

Τα δέντρα και γενικότερα τα φυτά χρειάζονται πολύ περισσότερο νερό, για να επιβιώσουν σε σχέση με τα ζώα. Οι ανάγκες τους πηγάζουν από τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Ωστόσο, η ίδια η φωτοσύνθεση καταναλώνει μόνο ένα μικρό μέρος του νερού που απορροφούν τα φυτά. Περισσότερο από το 90% αυτού του νερού «διαρρέει» στον αέρα μέσα από τα στόματα των φύλλων. Το νερό που εξατμίζεται από τα φύλλα τραβά τα γειτονικά του μόρια που βρίσκονται ακόμα λίγο πριν το στόμιο των πόρων των φύλλων (Κιτσάκης, 2008). Αυτή η έλξη μεταφέρεται μέσω των δεσμών υδρογόνου σε όλη τη διαδρομή μέσα από τον κορμό έως τις ρίζες. Το ίδιο το δέντρο δε χρειάζεται ούτε να τραβήξει, ούτε να σπρώξει. Όλη η ενέργεια που χρειάζεται για το ανέβασμα του νερού παρέχεται από τον ήλιο και τον άνεμο, που κι αυτός βοηθά στην εξάτμιση του νερού. Αν υπάρχει έλλειψη νερού στο έδαφος δημιουργούνται συνθήκες εμβολής στο ξύλωμα, λόγω σπηλαίωσης (δημιουργίας φυσαλίδων) και θραύση της στήλης νερού εντός της ρίζας (Alder et al., 1996), του βλαστού (Sperry and Tyree, 1988) και στα φύλλα (Salleo et al., 2001). Ως αποτέλεσμα διακοπής της παροχής νερού στους φυτικούς ιστούς τα κύτταρά τους υφίστανται πλασμόλυση και καταστρέφονται με αποτέλεσμα την απονέκρωση του φυτού.

Πλασμόλυση λέγεται το φαινόμενο όταν το φυτικό κύτταρο βρεθεί σε υδατικό διάλυμα μεγαλύτερης ωσμωτικής πίεσης, δηλαδή σε υπέρτονο διάλυμα (hypertonic). Τότε το νερό βγαίνει από το κύτταρο με αποτέλεσμα τη συρρίκνωση του κυττάρου (Κιτσάκης, 2008), (Γαλάτης κ.ά., 2003), (McDowell et al., 2008) (Εικόνα 2.2). Η πλασμόλυση των κυττάρων οφείλεται στην παρουσία μιας δομής, του χυμοτοπίου, το οποίο προσλαμβάνει νερό με τη βοήθεια της ώσμωσης. Χωρίς την ύπαρξη της μεμβράνης του χυμοτοπίου θα συνέβαινε απλή ανάμιξη των δύο διαλυμάτων ή του διαλύτη και του διαλύματος. Αν από την ημιπερατή μεμβράνη περνά και διαλυμένη ουσία, τότε η διαδικασία παύει να είναι ώσμωση και γίνεται διάχυση μεταξύ των δύο διαλυμάτων. Η ώσμωση πραγματοποιείται με σκοπό να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων από τις δύο πλευρές της ημιπερατής μεμβράνης.

Το φαινόμενο της ώσμωσης είναι πολύ σημαντικό στα διάφορα βιολογικά συστήματα, καθώς πολλές βιολογικές μεμβράνες είναι ημιπερατές. Έτσι, το γεμάτο νερό χυμοτόπιο, εξασκεί πίεση στο κυτταρόπλασμα και αυτό με τη σειρά του πιέζει το τοίχωμα του κυττάρου. Η πίεση αυτή επιτρέπει στο φυτικό κύτταρο να διατηρεί το σχήμα του, κατάσταση που αναφέρεται ως σπαργή (Εικόνα 2.2). Αυτή η πίεση συμβάλλει στην ακαμψία και στη μηχανική σταθερότητα των μη ξυλωδών φυτικών ιστών και είναι απαραίτητη για πολλές φυσιολογικές διεργασίες περιλαμβανομένης της διεύρυνσης των κυττάρων (αύξησης των φυτών), ανταλλαγή αερίων στα φύλλα, τη μεταφορά του νερού και των σακχάρων, και πολλές άλλες διεργασίες. Όταν λόγω σπηλαίωσης υπάρχει ανεπάρκεια στο νερό που φτάνει στα φυτικά κύτταρα, η πίεση σπαργής μειώνεται και αναγκάζει το φυτό να μαραίνεται (Κιτσάκης, 2008).



Εικόνα 2.2: Αντιπροσωπευτικές καταστάσεις των υδατικών σχέσεων ενός φυτικού κυττάρου (Γαλάτης κ.ά., 2003)

2.1.2 Απονέκρωση δένδρων λόγω έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων

Η υπόθεση του θανάτου των δένδρων εξαιτίας έλλειψης ενέργειας υποστηρίζει ότι ένα δέντρο δεν μπορεί να αναπτύσσεται λόγω περιορισμού της φωτοσύνθεσης όταν τα στόματα είναι κλειστά για παρατεταμένο χρονικό διάστημα και έτσι οδηγείται στην απονέκρωση (McDowell et al., 2008). Η υπόθεση αυτή όπως και αυτή της υδραυλικής κατάρρευσης επίσης σχετίζεται με τους βιοτικούς παράγοντες

Τα φυτά, με την πάροδο του χρόνου, έχουν προσαρμοστεί να ανέχονται ακραίες συνθήκες στη διαθεσιμότητα του νερού. Η διαθεσιμότητα του νερού στα φυτά επηρεάζεται από την υγρασία του εδάφους, ενώ η υφή και η δομή του εδάφους και των υποστρωμάτων του επηρεάζει τις δυνατότητές τους να συγκρατούν το νερό. Η πρόσληψη του νερού στα φυτά δεν συμβαδίζει πάντοτε με τα ποσοστά της διαπνοϊκής απώλειας του νερού, ακόμη και αν η υγρασία του εδάφους είναι επαρκής. Κατά τη διάρκεια ζεστών και ηλιόλουστων ημερών μπορεί να παρατηρηθεί προσωρινός μαρασμός, αλλά τα φυτά μπορούν να ενυδατωθούν μέσα στη νύχτα, όταν οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες και υπάρχει μειωμένη διαπνοϊκή απώλεια νερού. Μόνιμος μαρασμός και νέκρωση των φυτών μπορεί να συμβεί, εάν το έδαφος στεγνώσει τελείως από νερό και υγρασία, δηλαδή κατά την περίοδο μιας ξηρασίας.

Η διαθεσιμότητα σε νερό ρυθμίζει το άνοιγμα και το κλείσιμο των στομάτων, η οποία με τη σειρά της ρυθμίζει τη διαπνοή και τη φωτοσύνθεση. Εάν, στο ριζικό σύστημα είναι διαθέσιμο πολύ λίγο νερό, το φυτό θα μειώσει την ποσότητα του νερού που χάνει μέσω της διαπνοής του, κλείνοντας τα στόματα των φύλλων. Αυτό θα προκαλέσει μειωμένη φωτοσύνθεση, επειδή το απαραίτητο διοξείδιο του άνθρακα που εισέρχεται στο φυτό μέσω των στομάτων θα ελαχιστοποιηθεί, καθώς τα στόματα είναι κλειστά. Έτσι, κάθε μειωμένη απόδοση της φωτοσύνθεσης θα έχει ανάλογο αντίκτυπο στην απόδοση των φυτών (Κιτσάκης, 2008), ενώ κατά τη διάρκεια της περιόδου παρατεταμένης ξηρασίας το φυτό θα μπορούσε να λιμοκτονεί μπλοκάροντας την είσοδο του άνθρακα, ένα απαραίτητο στοιχείο για τη φωτοσύνθεση. Αν η ζήτηση για υδατάνθρακες συνεχίζεται δηλαδή διατηρείται σε υψηλότερο επίπεδο ο μεταβολισμός των φυτών, καταναλώνονται όλα τα ενεργειακά αποθέματα που υπάρχουν με αποτέλεσμα να οδηγείται το φυτό σε λιμοκτονία άνθρακα και σε αδυναμία να αποκρούσει βιοτικούς παράγοντες, όποιο από τα δύο συμβεί πρώτο (Εικόνα 2.1) (McDowell et al., 2008). "Είναι ο νόμος της διατήρησης της ενέργειας της οποίας τα φυτά πρέπει να υπακούσουν". "Μια αναλογία είναι, αν σταματήσουμε να κερδίζουμε χρήματα, αλλά διατηρούνται οι δαπάνες μας, οπότε τελικά ο τραπεζικός λογαριασμός μας θα χτυπήσει το μηδέν" (McDowell et al., 2008).

Τα εμπειρικά στοιχεία που υποστηρίζουν τον σύνδεσμο μεταξύ της διαθεσιμότητας του άνθρακα και της θνησιμότητας προέρχονται από πολυάριθμες μελέτες (Kolb and McCormick, 1993), (Pedersen, 1998), (Demchik and Sharpe, 2000), (Ogle et al., 2000), (Lloret et al., 2004), (Rolland and Lempriere, 2004), (Suarez et al., 2004), (Guarin and Taylor, 2005), (Bigler et al., 2006). Επιστήμονες που ασχολούνται με το θέμα αυτό δεν έχουν ακόμα διαλευκάνει τις αιτίες θνησιμότητας. Ο μηχανισμός θα μπορούσε να ενεργεί σε συνέργεια με προσβολές εντόμων κατά τη διάρκεια του θερμότερου καιρού (Allen, 2008). Σύμφωνα με την Sala (2010), η υπόθεση απαιτεί περισσότερα στοιχεία προτού γίνει εξ ολοκλήρου δεκτή και υπάρχει η ανάγκη να κρατηθούν όλες τις επιλογές ανοικτές προς έρευνα.

Κεφάλαιο Τρίτο

3. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που έχει επιλεγεί έχει ως στόχο να εξετάσει την υπόθεση ότι η απονέκρωση δένδρων σε συνθήκες ξηρασίας μπορεί να οφείλεται σε σταδιακή «λιμοκτονία» των δέντρων λόγω έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων (υδατανθράκων). Τυχόν απόρριψη αυτής της υπόθεσης αφήνει ανοικτό το ενδεχόμενο η απονέκρωση να προκαλείται λόγω πλασμόλυσης, εξαιτίας σοβαρής υδατικής ανεπάρκειας. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου γίνεται μέτρηση της διακύμανσης των επιπέδων των μη δομικών υδατανθράκων (Non Structural Carbohydrates-NSC). Οι NSC αποτελούνται από το άθροισμα των σακχάρων (γλυκόζη, φρουκτόζη και σακχαρόζη) και του αμύλου και εξετάστηκαν στους κύριους φυτικούς ιστούς χαλεπίου πεύκης (βελόνες-φύλλα, φλοιώμα και ξύλωμα κλαδιών, ξύλωμα κορμού και ρίζας) ως δείκτες των ενεργειακών αποθεμάτων των δένδρων.

Ελήφθησαν δείγματα δέντρων που βρίσκονται σε βιότοπους με διαφορετικά επίπεδα εδαφικής υγρασίας στην Ελλάδα και στη Γαλλία σε δύο εποχές του χρόνου. Την άνοιξη κατά την έναρξη της αυξητικής περιόδου και στο τέλος του καλοκαιριού όπου έχουμε θεωρητικά περιορισμένη αύξηση λόγω της θερινής ξηρασίας.

3.1 Ερευνητικά Ερωτήματα

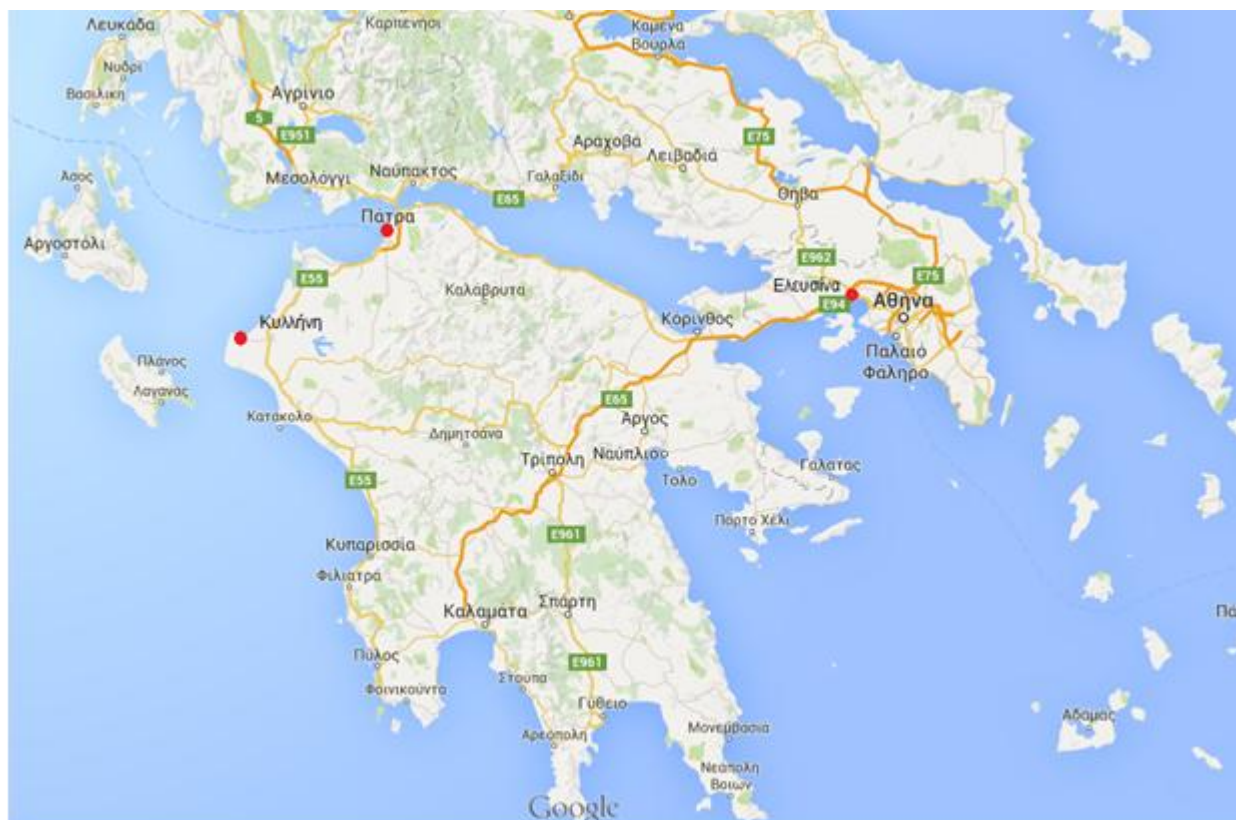
Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που αναμένονται να απαντηθούν είναι:

- 1) Αυξάνονται ή μειώνονται τα επίπεδα των NSC καθώς η ξηρότητα των βιοτόπων μεγαλώνει;
- 2) Υπάρχει κοινή ανταπόκριση τόσο για τα σάκχαρα όσο και για το άμυλο και η ανταπόκριση αυτή είναι παρόμοια σε διαφορετικούς φυτικούς ιστούς;
- 3) Υπάρχουν διαφορές στα παραπάνω μεταξύ άνοιξης και τέλος καλοκαιριού;

Οι NSC θεωρούνται μέτρο της έλλειψης ή αφθονίας άνθρακα για την αύξηση και τις μεταβολικές ανάγκες των δένδρων. Δηλαδή, ενώ η περιοδική μείωσή τους δεικνύει ότι η ζήτηση για άνθρακα ξεπερνάει τη δεδομένη προσφορά, μια σταθερά υψηλή συγκέντρωση NSC συντείνει στο ότι η φωτοσύνθεση καλύπτει ή και υπερβαίνει τις δομικές, μεταβολικές ή άλλες ανάγκες του φυτού (Körner, 2003). Συνεπώς η απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα θα συμβάλει να απαντηθεί και το ερώτημα αν απονέκρωση των δένδρων σε συνθήκες ξηρασίας μπορεί να οφείλεται σε σταδιακή «λιμοκτονία» τους λόγω έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων (υδατανθράκων).

3.2 Περιοχές Δειγματοληψίας

Οι λήψεις των δειγμάτων που μελετώνται στη παρούσα διατριβή έγιναν στην νότια Ελλάδα και στη νότια Γαλλία, σε περιοχές εξάπλωσης της χαλέπιου πεύκης (*Pinus halepensis* Mill.) (Εικόνα 3.1 και 3.2). Το κλίμα της νότιας Ελλάδας είναι τυπικά μεσογειακό, με ήπιους και υγρούς χειμώνες, σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια και, γενικά, μακρές περίοδοι ηλιοφάνειας κατά την μεγαλύτερη διάρκεια του έτους (ΕΜΥ, 2015). Το κλίμα της νότιας Γαλλίας γενικά είναι πιο ψυχρό και με μικρότερη ξηρή περίοδο το καλοκαίρι.



Εικόνα 3.1: Χάρτης από τη νότια Ελλάδα με τις περιοχές δειγματοληψίας (Google maps, 2015)



Εικόνα 3.2: Χάρτης της ευρύτερης περιοχής γύρω από τη Μασσαλία (νότια Γαλλία) με τις δύο περιοχές δειγματοληψίας (Google maps, 2015)

Έγινε επιλογή τριών περιοχών στην Ελλάδα όπου υπάρχει το είδος, στην Ελευσίνα, στα περίχωρα της Πάτρας και στην Κυλλήνη Ηλείας, καθώς επίσης και δύο περιοχές στην περιοχή της Προβηγκίας της Γαλλία, στο Saint Mitre και στο Font Blanche. Οι επιλογές των περιοχών αυτών έγιναν, έτσι ώστε να εμφανίζουν μια διαβάθμιση εδαφικής υγρασίας από ξηρότερες προς υγρότερες συνθήκες.

Για την ταξινόμηση της κάθε περιοχής σε ένα κλιματικό σύστημα χρησιμοποιείται ο δείκτης ξηρότητας de Martonne. Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιεί τη βροχόπτωση και τη θερμοκρασία στη θέση της εξάτμισης και χρησιμοποιείται ευρύτατα για την εκτίμηση της ξηρότητας μιας περιοχής. Δίνεται από την σχέση $I=P/(T+10)$, όπου P το ετήσιο ύψος της βροχής σε mm και T η μέση ετήσια θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$. Ο δείκτης de Martonne, μεταβάλλεται ανάλογα με την βροχόπτωση P και αντιστρόφως ανάλογα με την θερμοκρασία T . Ανάλογα με τις τιμές αυτών των δύο μεγεθών χαρακτηρίζεται και το κλίμα της κάθε περιοχής όπως φαίνεται και στον πίνακα 3.1, (The Hydrological Observatory of Athens, 2015).

Πίνακας 3.1: Κλιματική Κατάταξη του de Martonne (Hydrological Observatory of Athens, 2015)

ΚΛΙΜΑ	ΔΕΙΚΤΗΣ I	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ P (mm)
Ξηρό ή Ερημικό	$I < 10$	$P < 200$
Ημίξηρο	$10 < I < 20$	$200 < P < 400$
Μεσογειακό	$20 < I < 24$	$400 < P < 500$
Ημίυγρο	$24 < I < 28$	$500 < P < 600$
Υγρό	$28 < I < 35$	$600 < P < 700$
Πολύ υγρό	A) $35 < I < 55$ B) $I > 55$	$700 < P < 800$ $P > 800$

Η Ελευσίνα είναι πόλη του νομού Αττικής, έδρα της περιφερειακής ενότητας Δυτικής Αττικής, και βρίσκεται σε απόσταση 20 km από την Αθήνα. Κατέχει το ρεκόρ της υψηλότερης καταγεγραμμένης θερμοκρασίας στην Ευρώπη με 48,0 °C στις 10 Ιουλίου 1977 (Wikipedia, 2015). Από τα κλιματικά στοιχεία του Μετεωρολογικού Σταθμού Ελευσίνας (1958-1997), παρατηρήθηκε ότι το κλίμα της περιοχής μελέτης είναι Μεσογειακού Τύπου με υγρό και ήπιο χειμώνα και θερμό, ξηρό καλοκαίρι. Οι ετήσιες βροχοπτώσεις (372,9 mm), για το χρονικό διάστημα που αναφέρεται σημειώθηκαν κυρίως τους φθινοπωρινούς και τους χειμερινούς μήνες (Οκτώβριο – Μάρτιο). Με μέση θερμοκρασία της περιοχής τους 18,9 °C, ο δείκτης ξηρότητας υπολογίζεται ως εξής $I = 372,9 / (18,9 + 10) = 12,90$ και το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως «Ημίξηρο».

Η Πάτρα είναι η πρωτεύουσα του νομού Αχαΐας και της περιφέρειας Δυτικής Ελλάδας. Η περιοχή έχει μεσογειακό κλίμα με σχετικά ήπιους υγρούς χειμώνες και θερμά ξηρά καλοκαίρια χωρίς να λείπουν και κάποιες βροχοπτώσεις. Η υψηλότερη θερμοκρασία που έχει καταγραφεί (1955-1997) είναι 41,3 °C ενώ η χαμηλότερη -4,5 °C. Η ετήσια βροχόπτωση για την Πάτρα σύμφωνα με τον κοντινότερο μετεωρολογικό σταθμό είναι 580 mm και η μέση θερμοκρασία της, οι 17,87 °C (EMY, 2015). Σύμφωνα με τον δείκτη ξηρότητας $I = 20,81$ το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται «Μεσογειακό».

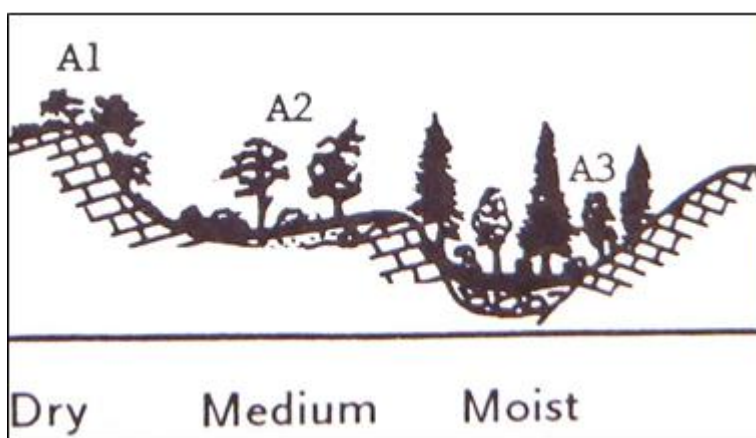
Η Κυλλήνη βρίσκεται στο δυτικότερο ακρωτήριο της Πελοποννήσου στο νομό Ηλείας. Η υψηλότερη θερμοκρασία που έχει καταγραφεί (1959-1997) είναι 39,8 °C ενώ η χαμηλότερη -5 °C. Η ετήσια βροχόπτωση σύμφωνα με τον κοντινότερο μετεωρολογικό σταθμό της Ανδραβίδας είναι 804 mm και η μέση θερμοκρασία της, οι 17,21 °C (EMY, 2015). Άρα σύμφωνα με την σχέση de Martonne, ο δείκτης ξηρότητας $I = 29,55$. Συνεπώς, το κλίμα στην περιοχή της Κυλλήνης σύμφωνα με τον δείκτη ξηρότητας χαρακτηρίζεται ως «Υγρό».

Η περιοχή Font-Blanche βρίσκεται στη νότια Γαλλία 26 km νότιο-ανατολικά της πόλης της Μασσαλίας και η περιοχή Saint Mitre 32 km βορειο-δυτικά της ίδιας πόλης. Η ετήσια βροχόπτωση σύμφωνα με τον μετεωρολογικό σταθμό εντός της πόλης της Μασσαλίας (1958-1997) είναι 535 mm και η μέση θερμοκρασία της, οι 15,25 °C (ECA&D, 2013), (Klein et al., 2002). Σύμφωνα με την σχέση de Martonne, ο δείκτης ξηρότητας υπολογίζεται ως εξής: $I = 535 / (15,25 + 10) = 21,19$. Άρα το κλίμα της ευρύτερης περιοχής σύμφωνα με τον δείκτη ξηρότητας χαρακτηρίζεται ως «Μεσογειακό». Οι συνθήκες αυτές διαφοροποιούνται στις περιοχές δειγματοληψίας προς το υγρότερο. Στην Saint Mitre, ο κοντινότερος σταθμός 5 km προς τα βόρεια της, στην πόλη Istres

(Meteo France, 2015) εμφανίζει για την ίδια χρονική περίοδο ετήσια βροχόπτωση 584 mm και μέση θερμοκρασία 14,5°C (I=23,79) δηλαδή το κλίμα της είναι στα όρια να χαρακτηριστεί ως «Υγρό». Από την άλλη ο σταθμός εντός της θέσης δειγματοληψίας στο δάσος της Font-Blanche εμφανίζει για την ίδια χρονική περίοδο ετήσια βροχόπτωση 752 mm και μέση θερμοκρασία 12,8°C (I=33,04) δηλαδή καθαρά «Υγρό» κλίμα.

3.3 Θέσεις δειγματοληψίας και πειραματικό υλικό

Ως πειραματικό υλικό χρησιμοποιείται το είδος *Pinus halepensis* Mill., το οποίο είναι το σημαντικότερο και κυρίαρχο είδος πεύκου στις περιοχές μελέτης (Ne'eman and Trabaud, 2000). Το είδος αυτό σύμφωνα με τον Lev-Yadun (2000) είναι ευαίσθητο στην εποχιακή διαθεσιμότητα υγρασίας. Πιο συγκεκριμένα από κάθε περιοχή επιλέχθηκαν δύο θέσεις δειγματοληψίας, μια σε ξηρότερο έδαφος και μια σε υγρότερο για να ελεγχθεί η επίδραση της ξηρασίας και σε τοπικό επίπεδο (Εικόνα 3.3, Εικόνες 3.4-3.13, Πίνακας 3.2). Οι περιοχές σε ξηρότερο έδαφος ήταν ή σε νότιες εκθέσεις με κλίση, ή σε κορυφή λόφων ή δημιουργήθηκαν λόγω τεχνητής αφαίρεση τμήματος της ετήσιας βροχόπτωσης. Το τελευταίο ισχύει για την περιοχή Font Blanche όπου με ειδικούς σωλήνες αφαιρείται από την πειραματική επιφάνεια το 30% περίπου της ετήσιας βροχόπτωσης πριν φτάσει στο έδαφος (Εικόνα 3.10). Οι δειγματοληψίες έγιναν σε δύο εποχές του χρόνου την άνοιξη και στο τέλος του καλοκαιριού του 2014, για να εξεταστούν διαφορετικά επίπεδα ξηρασίας αλλά και φαινολογικής κατάστασης των δένδρων.



Εικόνα 3.3: Διαφοροποίηση της εδαφικής υγρασίας ανάλογα με την τοπογραφία του εδάφους (A1-ξηρότερος βιότοπος, A2-ενδιάμεσης ξηρότητας και A3-υγρότερος βιότοπος), (Schweingruber et al., 1990)



Εικόνα 3.4 Ξηρός Βιότοπος Ελευσίνας



Εικόνα 3.5: Υγρός Βιότοπος Ελευσίνας



Εικόνα 3.6: Ξηρός Βιότοπος Πάτρας



Εικόνα 3.7: Υγρός Βιότοπος Πάτρας



Εικόνα 3.8: Ξηρός Βιότοπος Κυλλήνης



Εικόνα 3.9: Υγρός Βιότοπος Κυλλήνης



Εικόνα 3.10: Ξηρός Βιότοπος Font Blanche



Εικόνα 3.11: Υγρός Βιότοπος Font Blanche



Εικόνα 3.12: Ξηρός Βιότοπος Saint Mitre



Εικόνα 3.13: Υγρός Βιότοπος Saint Mitre

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά δειγματοληψιών

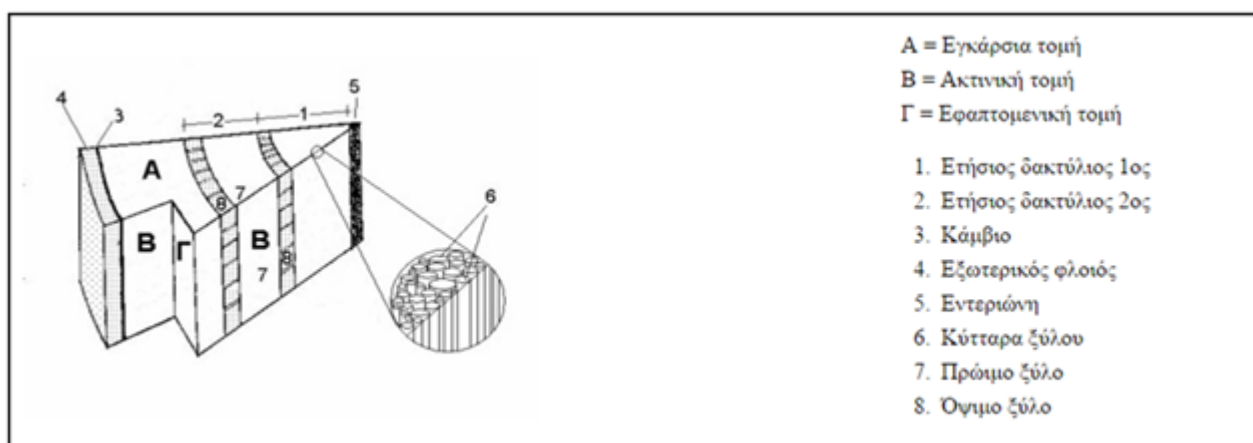
Περιοχή	Ημερομηνία Δειγματοληψίας		Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο (m)	Κλίση (%)	Έκθεση
	A	B					
Ελευσίνα (Y)	18-04-14	02-09-14	23° 29' 16,8"	38°02'34,44"	119	10-25%	Ανατολική
Ελευσίνα (Ξ)	22-04-14	02-09-14	23°28' 59,88"	38 ° 02' 34,8	185	15-20%	Νότια
Πάτρα (Y)	15-03-14	31-08-14	21°44'45.17"	38°16'42.88"	0	0	
Πάτρα (Ξ)	25-04-14	31-08-14	21°48'47,93"	38°15'50,92"	392	10-15%	Νότια
Κυλλήνη (Y)	26-04-14	30-08-14	21° 08' 27,6"	37°53'27,96"	219	30%	Βόρεια
Κυλλήνη (Ξ)	28-04-14	30-08-14	21° 08' 34,8"	37°53'20,76"	180	10-15%	Νότια
St.Mitre (Y)	05-05-14	20-08-14	5° 02' 08,61"	43°27'35,15"	44	0	
St.Mitre (Ξ)	05-05-14	20-08-14	5° 02' 23,2"	43°27'17,6"	135	0	
Font Blanche (Y)	06-05-14	21-08-14	5° 40' 42"	43° 14' 24"	430	0	
Font Blanche (Ξ)	06-05-14	21-08-14	5° 40' 44"	43° 14' 25"	430	0	
(Y=υγρότερος, Ξ=ξηρότερος βιότοπος)							

3.4 Δειγματοληψία και επεξεργασία δειγμάτων

Η δειγματοληψία και η επεξεργασία των δειγμάτων αφορά φυτικούς ιστούς δέντρου (χαλέπιου πεύκης) και ανάλυσής τους για εύρεση συγκέντρωσης NSC σε κάθε φυτικό ιστό. Σε κάθε θέση επιλέχθηκαν έξι δέντρα με τυχαίο τρόπο. Δηλαδή από κάθε μια από τις πέντε περιοχές δειγματοληψίας, επιλέχθηκε ένας ξηρός βιότοπος και ένας υγρός και σε κάθε ένα από αυτών, επιλέχθηκαν από 6 δέντρα, δηλαδή σύνολο 60 δέντρα για όλες τις περιοχές. Τα επιλεγθέντα δέντρα ήταν εξωτερικά υγιή και δεν υπήρχαν γύρω τους ενδείξεις κομμένων δέντρων, γεγονός που θα μπορούσε να επηρεάσει την αύξηση τους. Επίσης, ανήκαν στα κυρίαρχα δέντρα του βιοτόπου, δηλαδή δεν βρίσκονταν στη σκιά μεγαλύτερων δέντρων και ως εκ τούτου αποφεύχθηκε η επιλογή καταπονημένων δέντρων λόγω έλλειψης φωτός. Από κάθε δέντρο ως δείγμα πάρθηκαν (α) δύο ακραία τμήματα κλαδιών με βελόνες χωρίς σκίαση και νότιο προσανατολισμό, (β) ένα δείγμα από το ξύλωμα του κορμού που περιλάμβανε τους δακτυλίους του δέντρου μέχρι την εντεριόνη με χρήση τρυπανιού Pressler και (γ) δύο δείγματα από τις ρίζες του δένδρου με διάμετρο μολυβιού. Όλα τα δείγματα μετά τη λήψη τους τοποθετήθηκαν σε ψυχρό δοχείο με θερμοκρασία μεταξύ 5-10 °C. Αφού περάσαν έξι ώρες από την συλλογή, τα δείγματα αυτά θερμάνθηκαν για δύο λεπτά σε ειδικούς φούρνους στους περίπου 150 °C. Αυτό γίνεται για να θανατωθούν όλα τα ζωντανά

κύτταρα που υπάρχουν μέσα στα δείγματα (Popp et al., 1996). Στη συνέχεια ξηράνθηκαν στους 80 °C για 4 ώρες (Puri et al., 2015).

Για τα δείγματα (β) έγινε καθαρισμός του με ειδικό γυαλόχαρτο έτσι ώστε να διακρίνονται καθαρά οι δακτύλιοι. Το ξύλο είναι ένα φυσικό, οργανικό υλικό με κυτταρική δομή. Αποτελείται από ίνες σωληνωτών κυττάρων που συνενώνονται μεταξύ τους με λιγνίνη σε δέσμες. Στην εικόνα 3.14 φαίνονται τα κύρια τμήματα ενός κορμού με τους ετήσιους ή αυξητικούς δακτυλίους. Ακολούθησε η καταμέτρηση των δακτυλίων κάθε χρονιάς για τον προσδιορισμό της ηλικίας του δέντρου και στη συνέχεια η αποκοπή των δέκα πρώτων δακτυλίων στους οποίους μετρήθηκε στη συνέχεια η συγκέντρωση σε μη δομικούς υδατάνθρακες (1^η μέτρηση συγκέντρωσης NSC) (εικόνα 3.15). Τα δέντρα κυμαίνονται ηλικιακά μεταξύ 30 με 70 ετών και χαρακτηρίζονται ως ώριμα.



Εικόνα 3.14: Σχηματική παράσταση τομών τμήματος κορμού.



Εικόνα 3.15: Δακτύλιοι δέντρου που αφαιρέθηκαν με ειδικό τρυπάνι (Pressler)

Έπειτα για τα δείγματα με τα κλαδιά και τις βελόνες, έγινε ο εντοπισμός του ξηλώματος του κλαδιού για τη φετινή χρονιά και για τις δύο προηγούμενες με τη βοήθεια του κλαδοσπόνδυλου του κλαδιού (δηλαδή του κομβικού ανώτερου σημείου όπου την περίοδο ανάπτυξης θα ξεκινήσει την επιμήκυνσή του ο κεντρικός βλαστός και θα αναπτυχθούν και ορισμένα πλάγια κλαδιά).



Εικόνα 3.16: Δείγμα κλαδιών με τμήματα που σχηματίστηκαν τη φετινή και την περσινή χρονιά

Αφού εντοπίστηκε έγινε η αφαίρεση των βελόνων από το κλαδί της περσινής χρονιάς και επιλέχθηκαν 10 βελόνες για κάθε κλαδί, οι οποίες κόπηκαν στα δύο άκρα και κρατήθηκε το ενδιάμεσό τους περιεχόμενο. Η ίδια διαδικασία έγινε και για το δεύτερο κλαδί με τις βελόνες από το ίδιο δέντρο. Στο εργαστήριο έγινε ομογενοποίηση των δύο δείγματα από κάθε δέντρο με τις 10 βελόνες και από δείγμα που προέκυψε η μέτρηση της συγκέντρωσης των μη δομικών υδατανθράκων (2^η μέτρηση NSC). Στη συνέχεια αφού καθαρίστηκε το κλαδί από τις βελόνες έγινε μέτρηση του μήκους του ξηλώματος του κλαδιού της περσινής χρονιάς (δηλαδή της χρονιάς 2013) και της προπέρσινης χρονιάς (2012). Η μέτρηση έγινε με τη βοήθεια χάρακα και υπολογίστηκε ο λόγος της αύξησης τους. Στην εικόνα 3.16 φαίνονται καθαρά τα κλαδιά της φετινής χρονιάς μιας και το χρώμα τους είναι πιο ανοιχτόχρωμο καφέ ακόμα.

Έπειτα έγινε κοπή του ξηλώματος κλαδιού για την περσινή χρονιά (2013) και με μια λεπίδα έγινε αφαίρεση του φλοιώματος του κλαδιού. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για το δεύτερο κλαδί του ίδιου δέντρου και στη συνέχεια ενώθηκαν μεταξύ τους στο εργαστήριο (3^η μέτρηση NSC). Το ξύλωμα του κλαδιού που παρέμεινε μετά την αφαίρεση του φλοιού και για τα δύο κλαδιά επεξεργάστηκε για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης των ενεργειακών αποθεμάτων (4^η μέτρηση NSC) (εικόνα 3.17).



Εικόνα 3.17: Φλοίωμα και ξύλωμα κλαδιού

Τέλος τα δύο τμήματα από ρίζες (εικόνα 3.18) που πάρθηκαν από κάθε δέντρο, συνενώθηκαν σε ένα δείγμα και επεξεργάστηκαν ώστε να υπολογιστεί η συγκέντρωση των μη δομικών υδατανθράκων και στις ρίζες (5^η μέτρηση NSC). Συνολικά, δηλαδή για κάθε δέντρο πραγματοποιήθηκαν 5 μετρήσεις NSC στους παραπάνω φυτικούς ιστούς. Έτσι, για κάθε περιοχή δειγματοληψίας (12 δέντρα ανά περιοχή, 6 σε υγρό βιότοπο, 6 σε ξηρό βιότοπο), έγινε λήψη 60 μετρήσεων NSC.



Εικόνα 3.18: Δείγμα ριζών από χαλέπιο πεύκη

3.5 Εργαστηριακή επεξεργασία δειγμάτων

Στη συνέχεια αφού ετοιμάστηκαν τα δείγματα για κάθε περιοχή ξεχωριστά έγινε ο χημικός προσδιορισμός της συγκέντρωσης των NSC, δηλαδή των σακχάρων (γλυκόζη, φρουκτόζη και σακχαρόζη) καθώς επίσης και της συγκέντρωσης αμύλου στα δείγματα των φυτικών ιστών. Αυτός ο προσδιορισμός έγινε σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Βοτανικής του Πανεπιστημίου της Βασιλείας στην Ελβετία. Με την χρήση κατάλληλων βιοχημικών αντιδραστηρίων (ένζυμα) μετρήθηκε η συγκέντρωση σε σάκχαρα (γλυκόζη, φρουκτόζη και σακχαρόζη) και η συγκέντρωση του αμύλου στα δείγματα των φυτικών ιστών. Τα δείγματα προηγουμένως επεξεργάστηκαν κατάλληλα για να μετατραπούν σε λεπτόκοκκο υλικό.

Τα κύρια σημεία της μεθοδολογίας περιλαμβάνουν (α) χρήση κατάλληλων ενζύμων (ισομεράση-isomeras, ινβερτάση-invertase, κλαράση-clarase) για τη μετατροπή της φρουκτόζης, σακχαρόζης και του αμύλου σε γλυκόζη, σε διάφορα στάδια, και στη συνέχεια (β) τον φωτομετρικό προσδιορισμό της γλυκόζης (Hoch et al., 2002, 2003).

Πιο συγκεκριμένα τα δείγματα ξηράνθηκαν και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε ειδικό μίξερ για την μετατροπή τους σε σκόνη. Στη συνέχεια οι φυτικοί ιστοί εκχυλίστηκαν με αποσταγμένο νερό για 30 λεπτά σε συνθήκες βρασμού. Το απόσταγμα φυγοκεντρήθηκε και ένα κλάσμα του επεξεργάστηκε με ισομεράση και ινβερτάση για τη μετατροπή της φρουκτόζης και της σακχαρόζης σε γλυκόζη (Διάλυμα Α). Η γλυκόζη στη συνέχεια μετατράπηκε ενζυματικά σε 6-φωσφορική γλυκόζη (αντίδραση εξωκινάσης, εξωκινάνση από τη Sigma Diagnostics, St. Louis, MO, USA). Η συνολική ποσότητα της γλυκόζης (το άθροισμα δηλαδή της ελεύθερης γλυκόζης, της φρουκτόζης και της σακχαρόζης) προσδιορίστηκαν φωτομετρικά στα 340 nm (HR 7000, Hamilton, Reno, NE, USA). Στη συνέχεια το Διάλυμα Α που περιλαμβάνει πλέον μόνο γλυκόζη και άμυλο επεξεργάστηκε με το ένζυμο κλαράση για τη μετατροπή και του αμύλου σε γλυκόζη (“Clarase” from *Aspergillus oryzae*, Enzyme Solutions Pty Ltd., Croydon South, VIC, AUS) μέσω επώασης στους 40°C για 15 ώρες (Διάλυμα Β). Η παραπάνω διαδικασία επαναλήφθηκε για τον φωτομετρικό προσδιορισμό της γλυκόζης που αντιστοιχεί πλέον στο σύνολο των NSC. Το άμυλο υπολογίστηκε αφαιρώντας από γλυκόζη των NSC (από το Διάλυμα Β) τη γλυκόζη από τα ελεύθερα σάκχαρα (από το Διάλυμα Β). Καθαρό άμυλο και γλυκόζη, φρουκτόζη και σακχαρόζη χρησιμοποιήθηκαν ως πρότυπα και πρότυπη σκόνη των φυτών συμπεριλήφθηκε για τον έλεγχο της επαναληψιμότητας των εκχυλίσεων. Οι συγκεντρώσεις των NSC εκφράζονται με βάση το ποσοστό ξηρής ύλης (mg/g), (Hoch et al., 2002, 2003), (Puri et al., 2015).

3.6 Μετρήσεις υδατικού δυναμικού

Το δυναμικό του νερού (Ψ_w , water potential) αποτελεί ένα σχετικό μέγεθος το οποίο εκφράζει τη διαφορά του δυναμικού του νερού σε δεδομένη κατάσταση σε σχέση με αυτή του αποσταγμένου νερού υπό κανονική ατμοσφαιρική πίεση. Ως τιμή του δυναμικού του αποσταγμένου νερού ορίζεται αυθαίρετως το μηδέν. Η εκτίμηση του είναι θεμελιώδους σημασίας επειδή η γνώση της διαφοράς του δυναμικού του νερού μεταξύ δύο περιοχών υποδεικνύει και την κατεύθυνση μετακίνησης του νερού. Κατά συνέπεια το δυναμικό του νερού μιας δεδομένης κατάστασης παίρνει τιμές από το 0 (του καθαρού νερού) και αρνητικές (σε διαλύματα) και εκφράζεται σε μονάδες

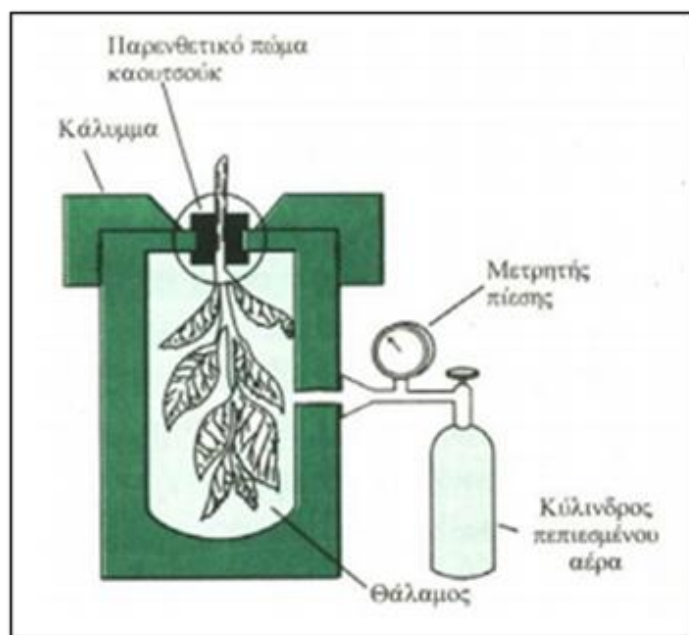
πίεσης MPa (Mega Pascal). Αν για οποιοδήποτε λόγο υπάρχουν μάζες νερού με διαφορετικό δυναμικό σε δύο περιοχές (ή σημεία) του φυτικού σώματος θα πραγματοποιηθεί αυθόρμητη μεταφορά νερού από την περιοχή με υψηλό δυναμικό προς αυτήν με χαμηλό δυναμικό (Μπρέστα, 2009).

Η τιμή του δυναμικού του νερού αποτελεί επίσης ένα μέτρο της ενδεχόμενης υδατικής καταπόνησης ενός φυτού. Για κάθε φυτό υπάρχει ένα Ψ_w κάτω από το οποίο σταματούν οι λειτουργίες του. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το υδατικό δυναμικό είναι οι εξής: η συγκέντρωση του νερού (Ψ_s), η πίεση (Ψ_p) και η βαρύτητα (Ψ_g) και δίνεται από την σχέση $\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g$.

Η μέτρηση του υδατικού δυναμικού των φύλλων χρησιμοποιείται ως δείκτης της υδατικής κατάστασης των φυτών. Ο απλούστερος τρόπος για να μετρηθεί το δυναμικό του νερού των φύλλων είναι με ένα όργανο που καλείται θάλαμος πίεσης, το οποίο σχεδιάστηκε από τον Scholander (Scholander, 1966). Η μέθοδος του θαλάμου πίεσης στηρίζεται στην εφαρμογή πίεσης στο μίσχο μέχρι αυτή να γίνει ίση ή μεγαλύτερη από την πίεση του υδατικού δυναμικού του φύλλου. Ένας μεταλλικός θάλαμος ο οποίος είναι πλήρως στεγανοποιημένος, με καπάκι το οποίο ανοίγει και έτσι επιτρέπει να τοποθετηθεί μέσα το φύλλο. Στο καπάκι υπάρχει μικρή οπή από την οποία εξέρχεται ο μίσχος για να επιτρέπει έτσι την παρατήρηση του σημείου εξισορρόπησης της πίεσης. Ο θάλαμος συνδέεται με φιάλη αζώτου με τη βοήθεια του οποίου αυξάνεται η πίεση στο εσωτερικό του και ένα μανόμετρο για την καταγραφή της πίεσης. Όταν η πίεση στο θάλαμο είναι ίση με την πίεση του βλαστού, μια σταγόνα νερό εμφανίζεται στην επιφάνεια κοπής. Υποθέτοντας ότι το δυναμικό του είναι πολύ χαμηλό, η πίεση αντιπροσωπεύει το δυναμικό ισορροπίας του νερού του φυτικού υλικού στο θάλαμο (Hinckley et al., 1978), (Ackerly, 2004), (Bucci et al., 2004), (Lenz et al., 2008), (Bartlett et al., 2012).

Κατά τις βραδινές ώρες όπου δεν συντελείται διαπνοή από τα φύλλα, το δυναμικό νερού εντός των φυτικών ιστών έρχεται σε ισορροπία με το δυναμικό νερού του εδάφους και αποτελεί δείκτη της διαθεσιμότητας εδαφικής υγρασίας (Μπρέστα, 2009). Η μέτρηση του δυναμικού νερού των φυτικών ιστών που δίνει αυτήν την πληροφορία γίνεται πριν την αυγή (pre-dawn).

Σε κάθε δένδρο στο τέλος του καλοκαιριού του 2014 ελήφθησαν 2 κλαδίσκοι με φύλλα πριν την αυγή και η μέτρηση του δυναμικού του νερού τους έγινε επί τόπου για μια περίοδο όχι περισσότερο από μισή ώρα μεταξύ της πρώτης μιας τελευταίας μέτρησης.

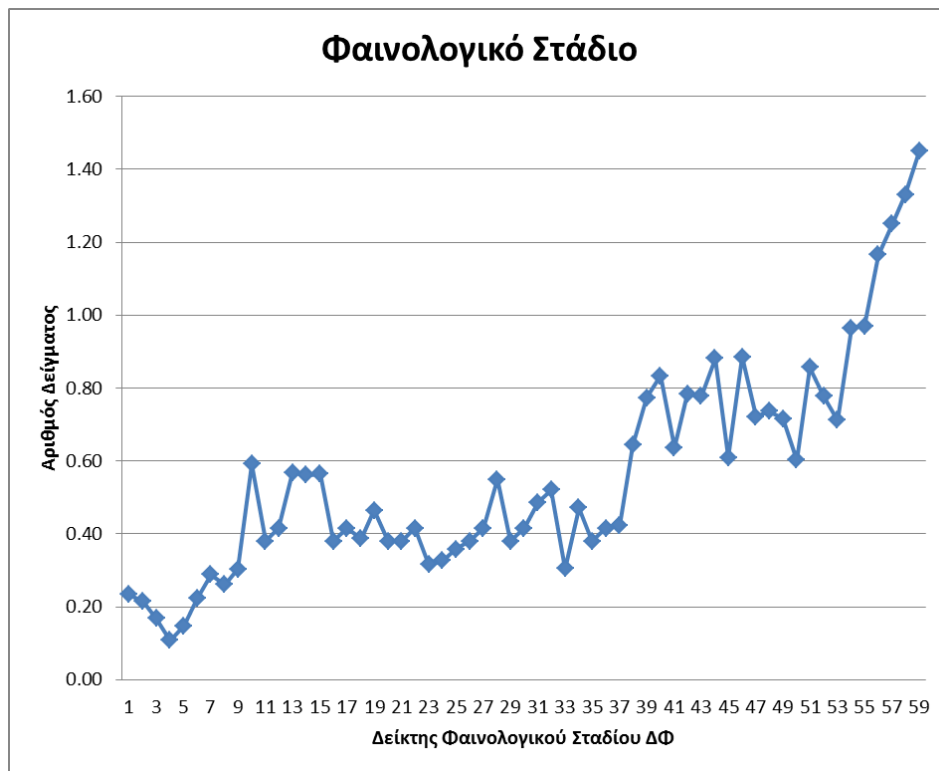


Εικόνα 3.19: Θάλαμος πίεσης Scholander (Chone et al., 2001)

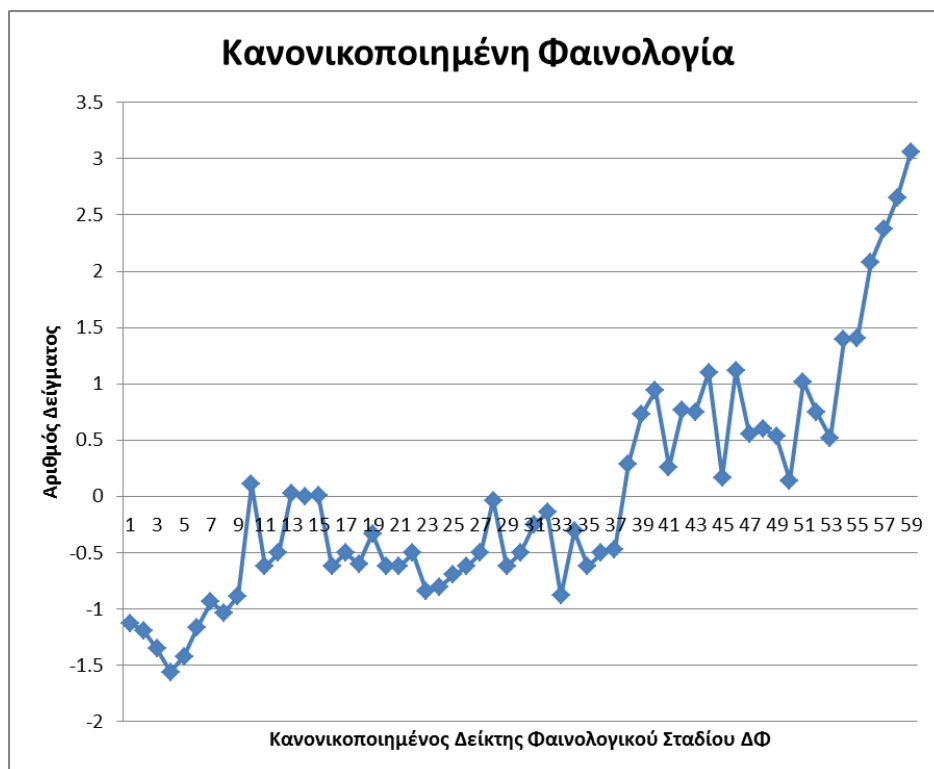
3.7 Προσδιορισμός φαινολογικού σταδίου

Καθότι τα επίπεδα των NSC την άνοιξη μπορεί να επηρεαστούν από το διαφορετικό φαινολογικό στάδιο στο οποίο μπορεί να βρίσκονται τα δένδρα (Körner, 2003), (τόσο εντός του ίδιου όσο και μεταξύ διαφορετικών βιοτόπων) έγινε προσδιορισμός του αναπτυξιακού σταδίου κάθε δένδρου και αφαίρεση των δένδρων που εμφάνισαν πολύ καθυστερημένη ή πολύ πρόωμη αύξηση. Ως δείκτης χρησιμοποιήθηκε το μήκος του ξηλώματος κλαδιού της φετινής χρονιάς σε σχέση με την περσινή.

Για τον παραπάνω σκοπό υπολογίστηκε ένας δείκτης φαινολογικού σταδίου ($\Delta\Phi$). Για την εκτίμησή του υπολογίστηκε αρχικά ο λόγος του μήκους ξηλώματος κλαδιού για τη φετινή χρονιά δια την περσινή, για την άνοιξη για όλα τα δείγματα όλως των περιοχών. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για το καλοκαίρι. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο λόγος των δύο αυτών αποτελεσμάτων, δηλαδή της τιμής που βρέθηκε για την άνοιξη δια αυτής της τιμής που βρέθηκε το καλοκαίρι. Έτσι για κάθε δένδρο αντιστοιχεί μια τιμή που δείχνει το φαινολογικό στάδιο των κλαδιών κατά τη χρονική στιγμή της δειγματοληψίας. Η επιλογή έγινε σύμφωνα με το Διάγραμμα 3.2 όπου δείχνει τις τιμές σε κανονικοποιημένη μορφή. Απορρίφθηκαν οι τιμές πάνω από +1 και κάτω από -1 τυπική απόκλιση. Αυτές αντιστοιχούσαν σε τιμές του $\Delta\Phi$ κάτω από 0,29 και πάνω από 0,85.



Διάγραμμα 3.1 Δείκτης φαινολογικού σταδίου κάθε δένδρου



Διάγραμμα 3.2: Κανονικοποιημένος δείκτης φαινολογικού σταδίου κάθε δένδρου

3.8 Στατιστική ανάλυση

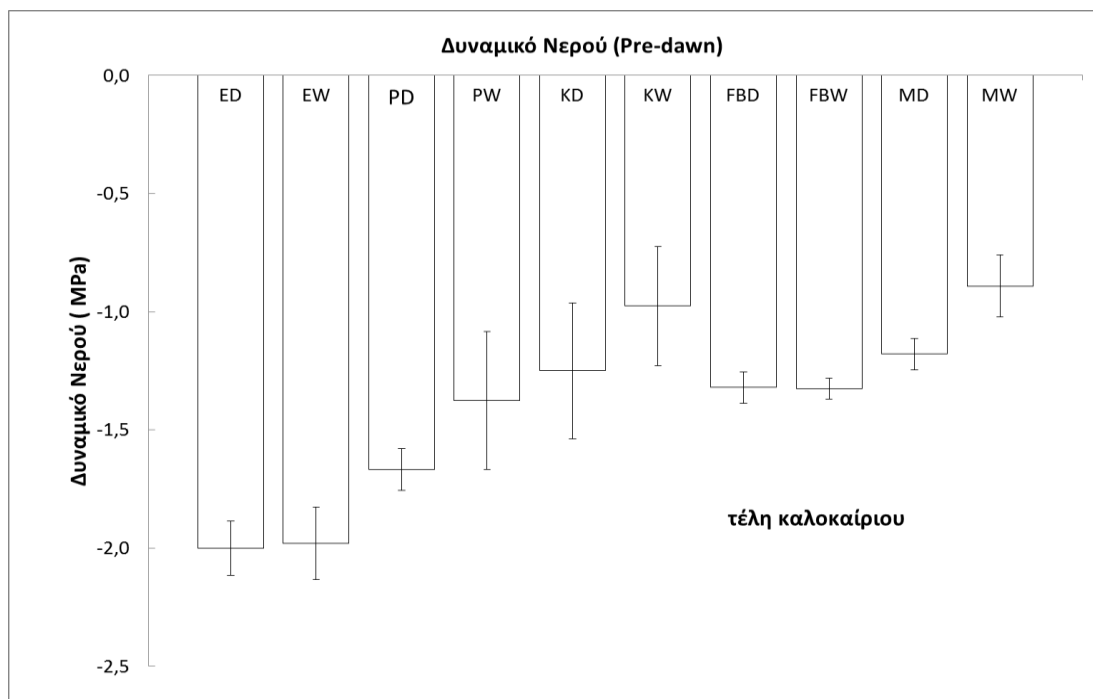
Προκειμένου να συγκριθούν μέσες τιμές, πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός τυπικών αποκλίσεων από τους μέσους όρους και στη συνέχεια υπολογισμός των τυπικών σφαλμάτων μέσω της Excel, για τα ποσοστά ξηρής μάζας των φυτικών ιστών, για τις τιμές του δυναμικού του νερού αλλά και για τις συγκεντρώσεις NSC. Τα δεδομένα ΔΦ μετατράπηκαν σε δεδομένα κανονικής κατανομής (Z-scores). Με την χρήση του προγράμματος SPSS πραγματοποιήθηκε γραμμική συσχέτιση μεταξύ των ποσοτικών μεταβλητών με χρήση του συντελεστή συσχέτισης Pearson's (r) για την εκτίμηση του βαθμού συσχέτισης. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson (r) παίρνει τις τιμές: $-1 < r < +1$. Ο υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης πραγματοποιείται με την εξής εντολή: Από τη βασική ράβδο προτιμήσεων του λογισμικού επιλέχθηκε: Analyze – Correlate – Bivariate. Στο πλαίσιο διαλόγου της διαδικασίας Bivariate Correlations, έγινε επιλογή των μεταβλητών των οποίων τη σχέση αναζητούμε και τις μετακινήσαμε στο πλαίσιο Variable(s). Από τον πίνακα αποτελεσμάτων που αφορά στον συντελεστή συσχέτισης, έγινε καταγραφή της τιμής του συντελεστή (r) και της στατιστικής σημαντικότητας (P). Στατιστικώς σημαντικές θεωρήθηκαν οι συσχετίσεις όπου $P < 0,05$. Προηγήθηκε έλεγχος κανονικής κατανομής των δεδομένων με το τεστ Kolmogorov-Smirnov.

Κεφάλαιο Τέταρτο

4. Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων ανά περιοχή μελέτης, έτσι όπως προέκυψαν μετά την επεξεργασία. Αρχικά γίνεται αξιολόγηση της διαθέσιμης υγρασίας με βάση τις τιμές του δυναμικού του νερού σε κάθε βιότοπο, στη συνέχεια εκτίμηση του ποσοστού ξηρής μάζας σε ενεργειακά αποθέματα στα διάφορα μέρη του δέντρου, στο ξύλωμα κορμού, στις ρίζες, στις βελόνες, στο φλοιώμα κλαδιών και στο ξύλωμα των κλαδιών για τις δύο χρονικές περιόδους, άνοιξη-καλοκαίρι, στις οποίες πραγματοποιήθηκε η δειγματοληψία. Έπειτα ακολουθούν τα διαγράμματα συσχέτισης του δυναμικού του νερού σε συνάρτηση με τα ενεργειακά αποθέματα στα διάφορα μέρη του δέντρου.

4.1 Υδατικές συνθήκες ανά βιότοπο



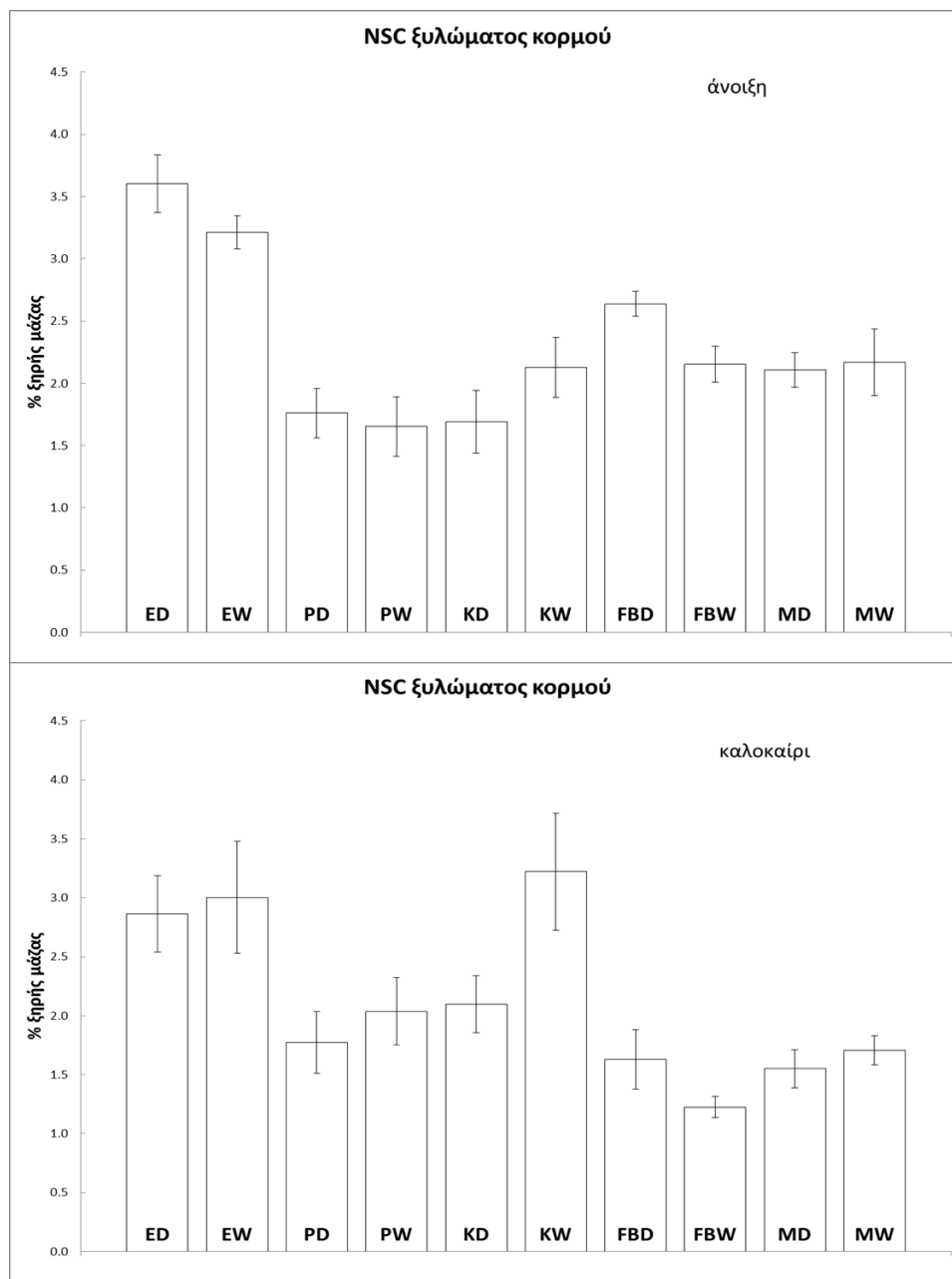
Διάγραμμα 4: Δυναμικό νερού (ΔΝ) πριν την αυγή (με τυπικό σφάλμα) για τα δένδρα στα οποία έγινε δειγματοληψία NSC στο τέλος του καλοκαιριού-αρχές φθινοπώρου 2014. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche (FR), M= St. Mitre (FR), D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος N=6 δένδρα εκτός KD, PW όπου n=4 και PD n=3.

Από το Διάγραμμα 4 προκύπτει ότι υπάρχει μια σημαντική διαφοροποίηση ως προς την υδατική καταπόνηση που εμφανίζουν τα δένδρα ανά περιοχή. Τα δένδρα της περιοχής Ελευσίνας τόσο για

τον υγρότερο όσο και για τον ξηρότερο βιότοπο εμφανίζουν την υψηλότερη καταπόνηση πριν την αυγή όπου και το δυναμικό νερού (ΔN) του ξυλώματος είναι σε ισορροπία με το δυναμικό νερού του εδάφους. Με βάση το εύρος του τυπικού σφάλματος οι τιμές ΔN των δένδρων της Ελευσίνας εμφανίζουν στατιστικώς σημαντική διαφορά από τα δένδρα των υπολοίπων περιοχών. Ακολουθούν σε υδατική καταπόνηση τα δένδρα από τον ξηρότερο βιότοπο της Πάτρας (όμως με μικρό αριθμό δείγματος). Τις συνθήκες με τη μικρότερη υδατική καταπόνηση φαίνεται να αντιμετωπίζουν τα δένδρα από την υγρότερη περιοχή της Κυλλήνης και την υγρότερη περιοχή St. Mitre της νότιας Γαλλίας.

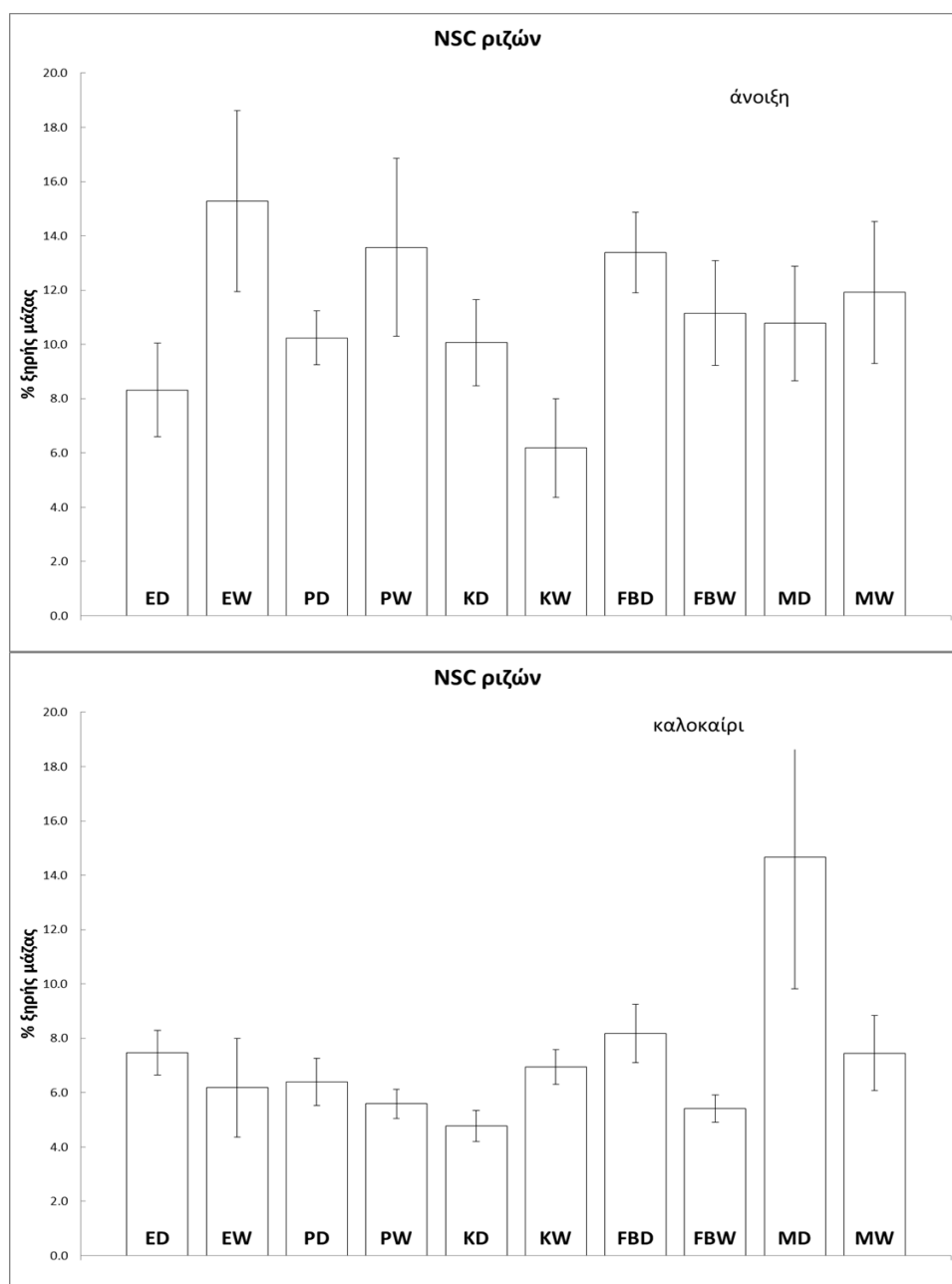
4.2 Συγκρίσεις των συγκεντρώσεων των μη δομικών υδατανθράκων των δένδρων ανά ιστό, περιοχή και εποχή

Γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων έτσι όπως προέκυψαν μετά από την επεξεργασία, για τις συγκεντρώσεις NSC, σακχάρων και αμύλου στα δείγματα που λήφθηκαν ανά ιστό, περιοχή και εποχή.



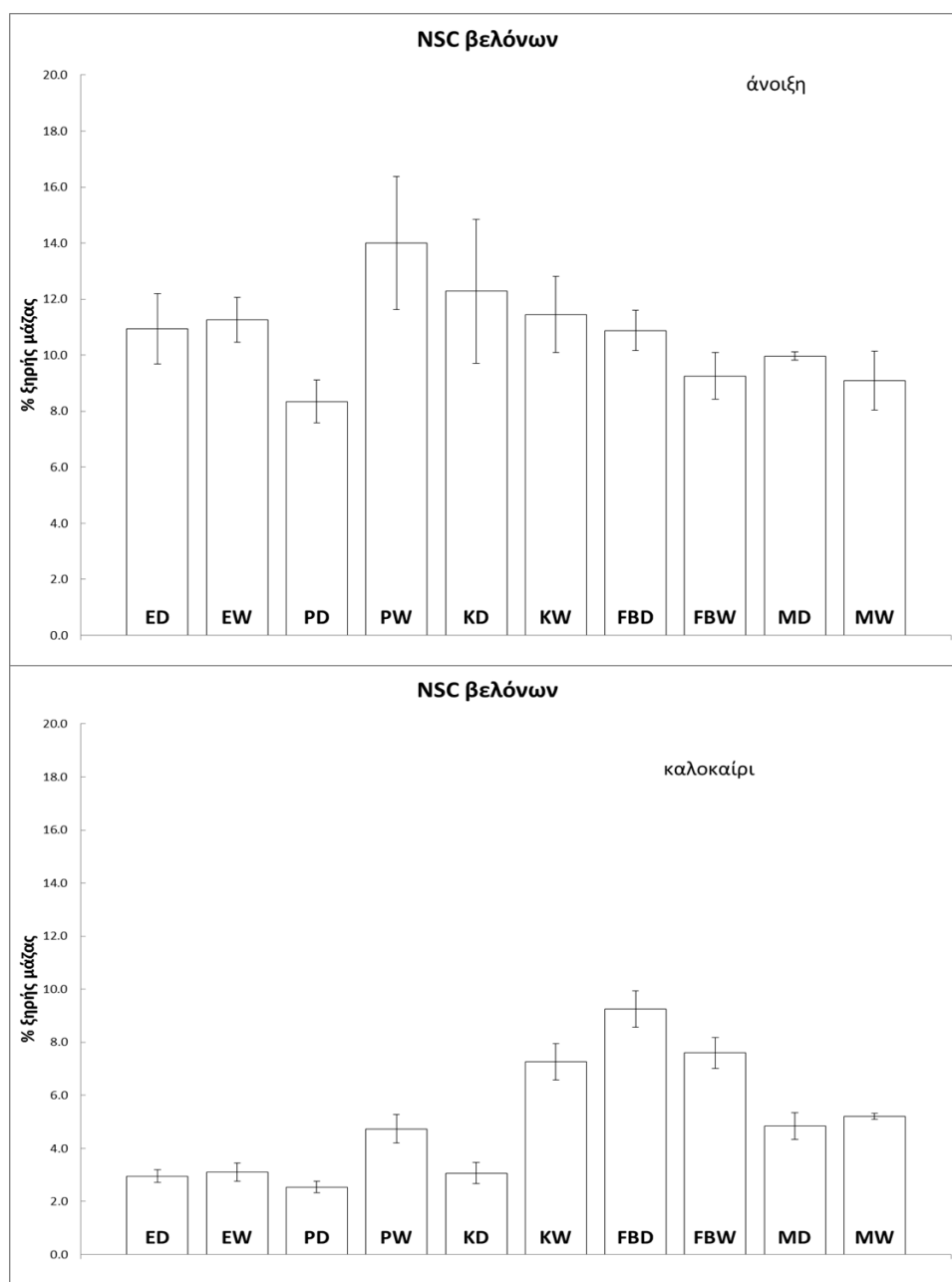
Διάγραμμα 4.1: Συγκέντρωση NSC ξυλώματος κορμού σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι μαζί με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Στο Διάγραμμα 4.1 παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές NSC του ξυλώματος κορμού εμφανίζεται στις περιοχές της Ελευσίνας, καθώς επίσης και στον ξηρό βιότοπο Font-Blanche στη Γαλλία κατά την περίοδο της άνοιξης. Παρόμοια, συμπεριφορά παρατηρείται και το καλοκαίρι στην περιοχή της Ελευσίνας, αλλά και μια μεγάλη αύξηση NSC στον υγρότερο βιότοπο της Κυλλήνης (με μεγάλο όμως τυπικό σφάλμα). Οι υπόλοιπες περιοχές κυμαίνονται στα ίδια ποσοστά λαμβάνοντας υπόψη και το τυπικό σφάλμα. Επίσης, από τη σύγκριση μεταξύ άνοιξης και καλοκαιριού προκύπτει μια στατιστικώς σημαντική μείωση στις τιμές NSC το καλοκαίρι σε όλους τους βιότοπους της Γαλλίας.



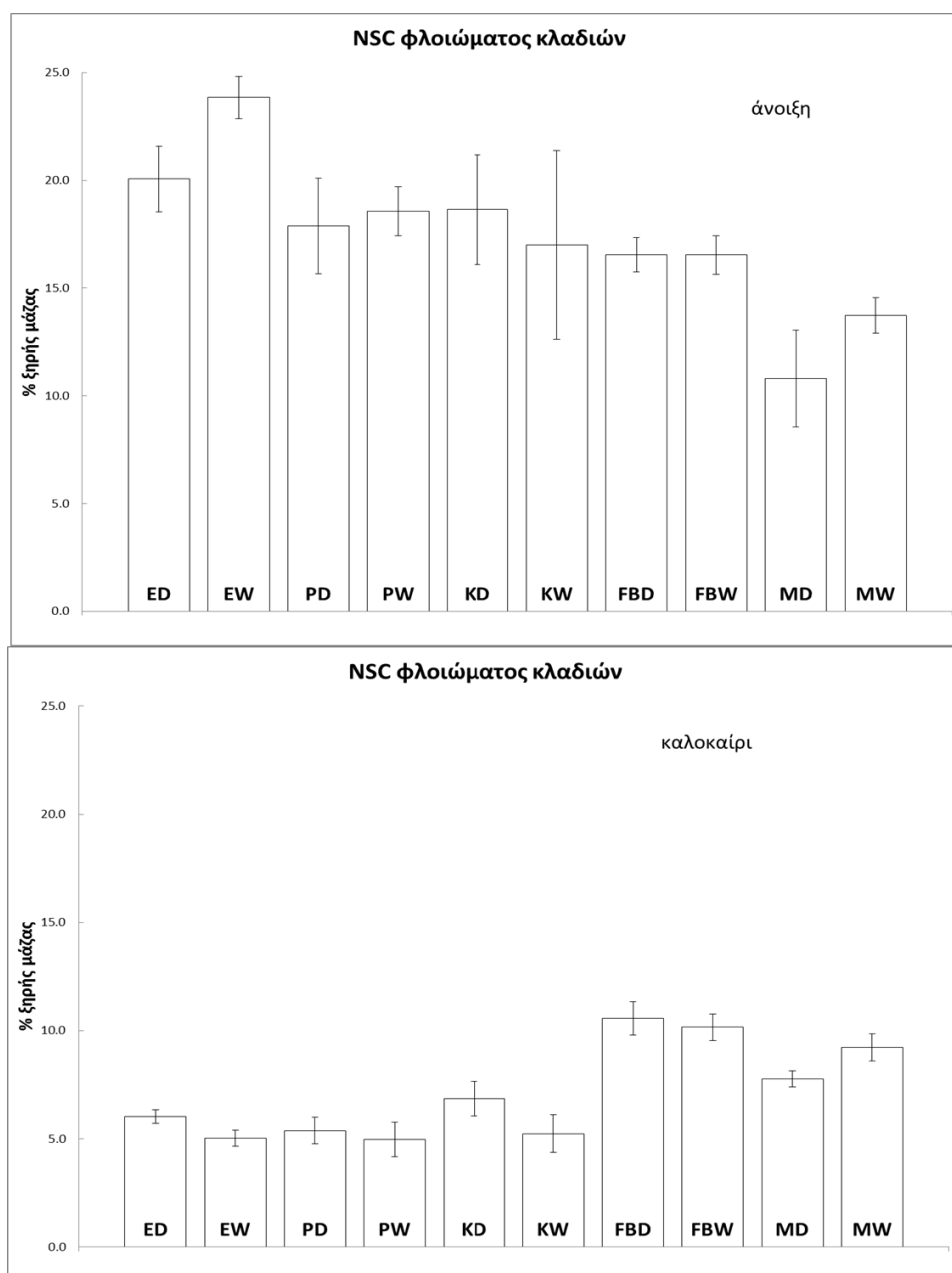
Διάγραμμα 4.2: Συγκέντρωση NSC ριζών σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι μαζί με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Στο Διάγραμμα 4.2 παρατηρείται μια μικρή τάση για υψηλότερες τιμές NSC στους υγρούς βιοτόπους Ελευσίνας και Κυλλήνης καθώς και στον ξηρό βιότοπο Font-Blanche κατά την περίοδο της άνοιξης, ενώ το καλοκαίρι παρατηρείται μια μεγάλη αύξηση στην περιοχή Saint Mitre στη Γαλλία αλλά με πολύ μεγάλο εύρος τυπικού σφάλματος.



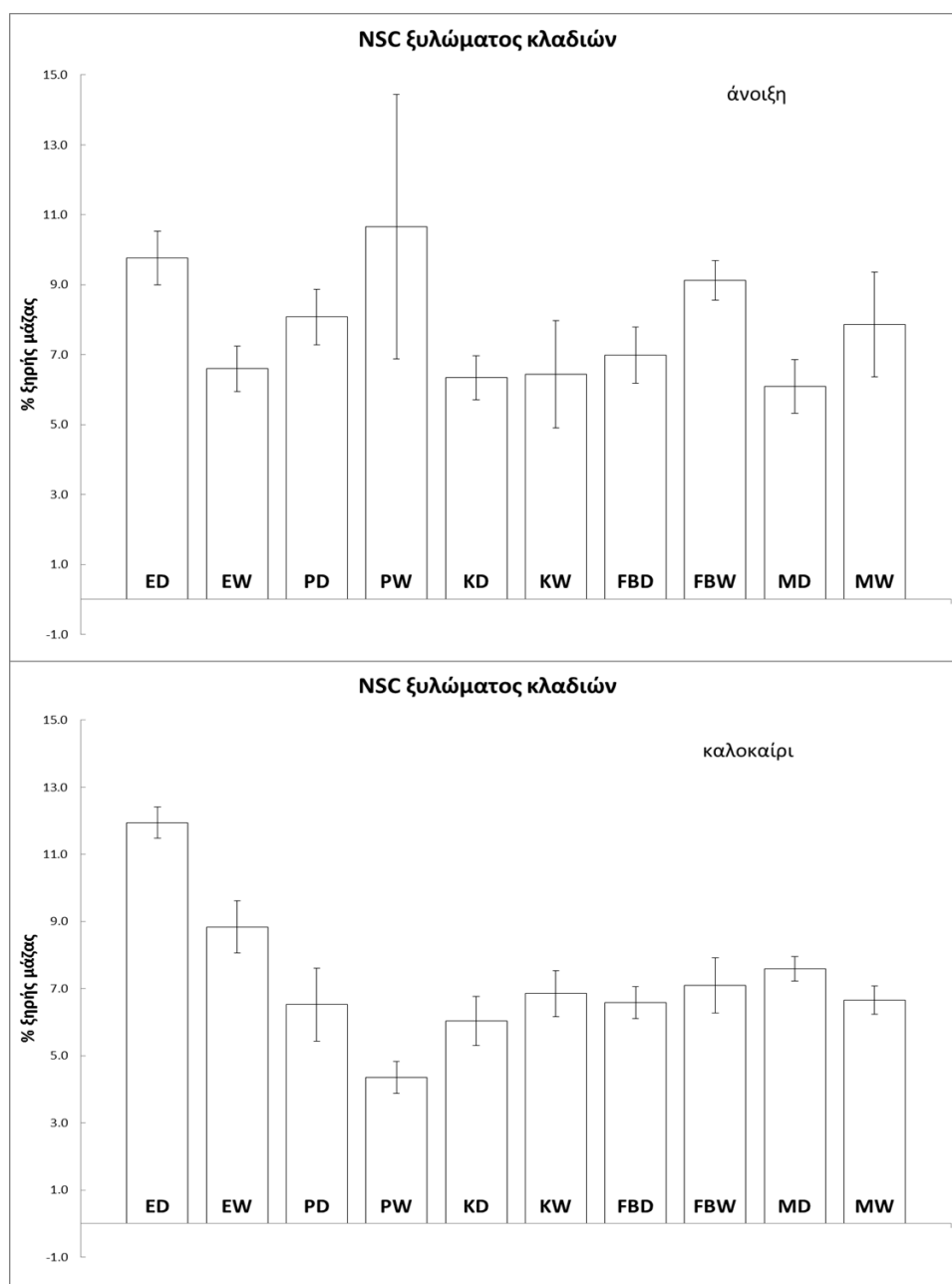
Διάγραμμα 4.3: Συγκέντρωση NSC βελόνων σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι μαζί με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Στο Διάγραμμα 4.3 αν και δεν παρατηρείται την άνοιξη σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των περιοχών, το καλοκαίρι παρατηρείται μια στατιστικώς σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης NSC στις τιμές των υγρών βιοτόπων Πάτρας και Κυλλήνης καθώς και σε όλους τους βιοτόπους της Γαλλίας σε σχέση με τους πιο ξηρούς βιοτόπους



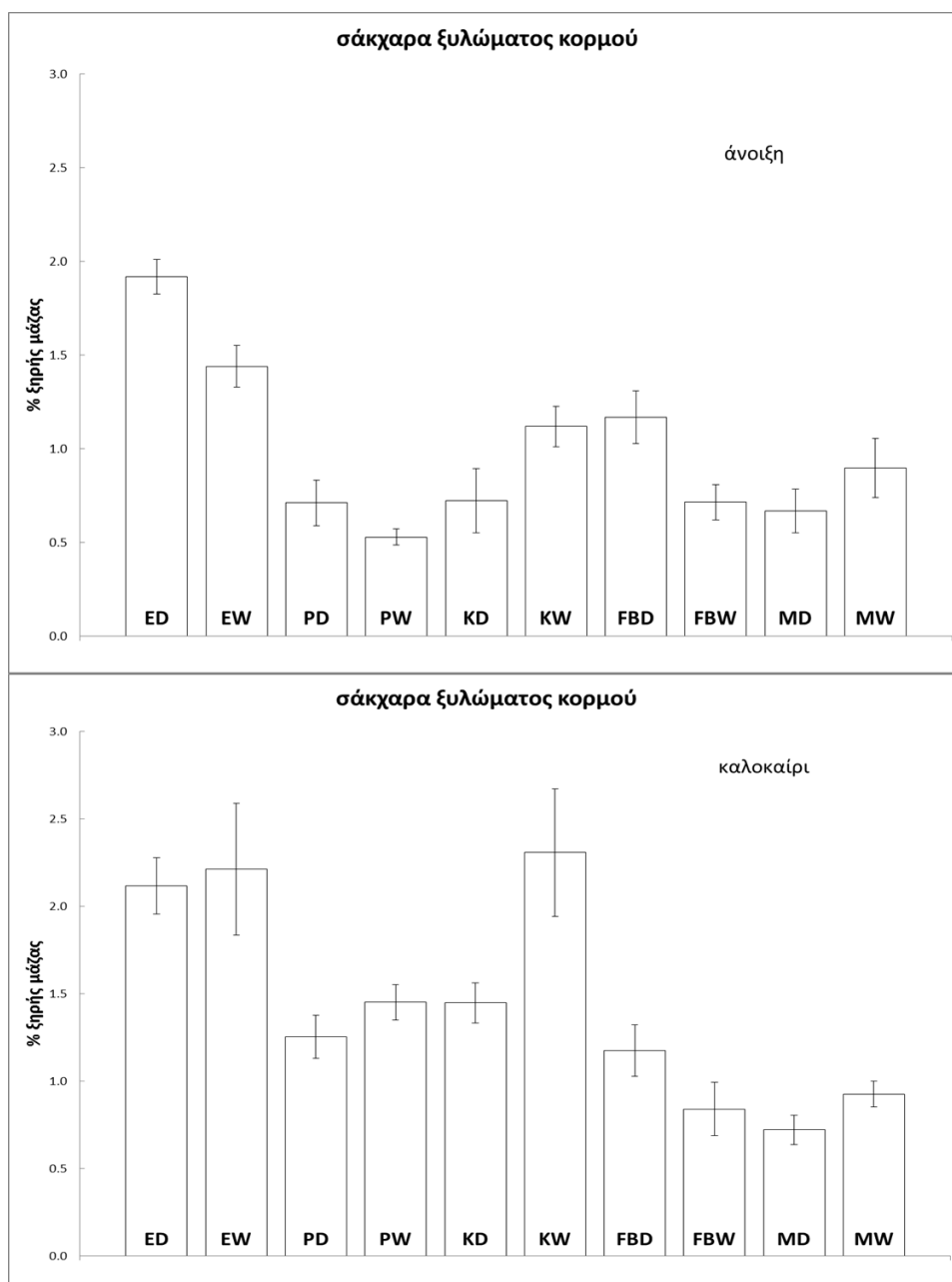
Διάγραμμα 4.4: Συγκέντρωση NSC φλοιώματος κλαδιών σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.4 η περιοχή της Ελευσίνας (υγρός βιότοπος) ξεχωρίζει με αυξημένες τιμές NSC στο φλοιώμα κλαδιών κατά την άνοιξη. Χαμηλή τιμή παρουσιάζει η περιοχή Saint-Mitre. Το καλοκαίρι παρατηρείται μια διαφορά μεταξύ Ελλάδας και Γαλλίας, με την τελευταία να παρουσιάζει μεγαλύτερα ποσοστά. Οι τιμές NSC φλοιώματος κλαδιών το καλοκαίρι είναι πολύ πιο μικρές από της άνοιξης.



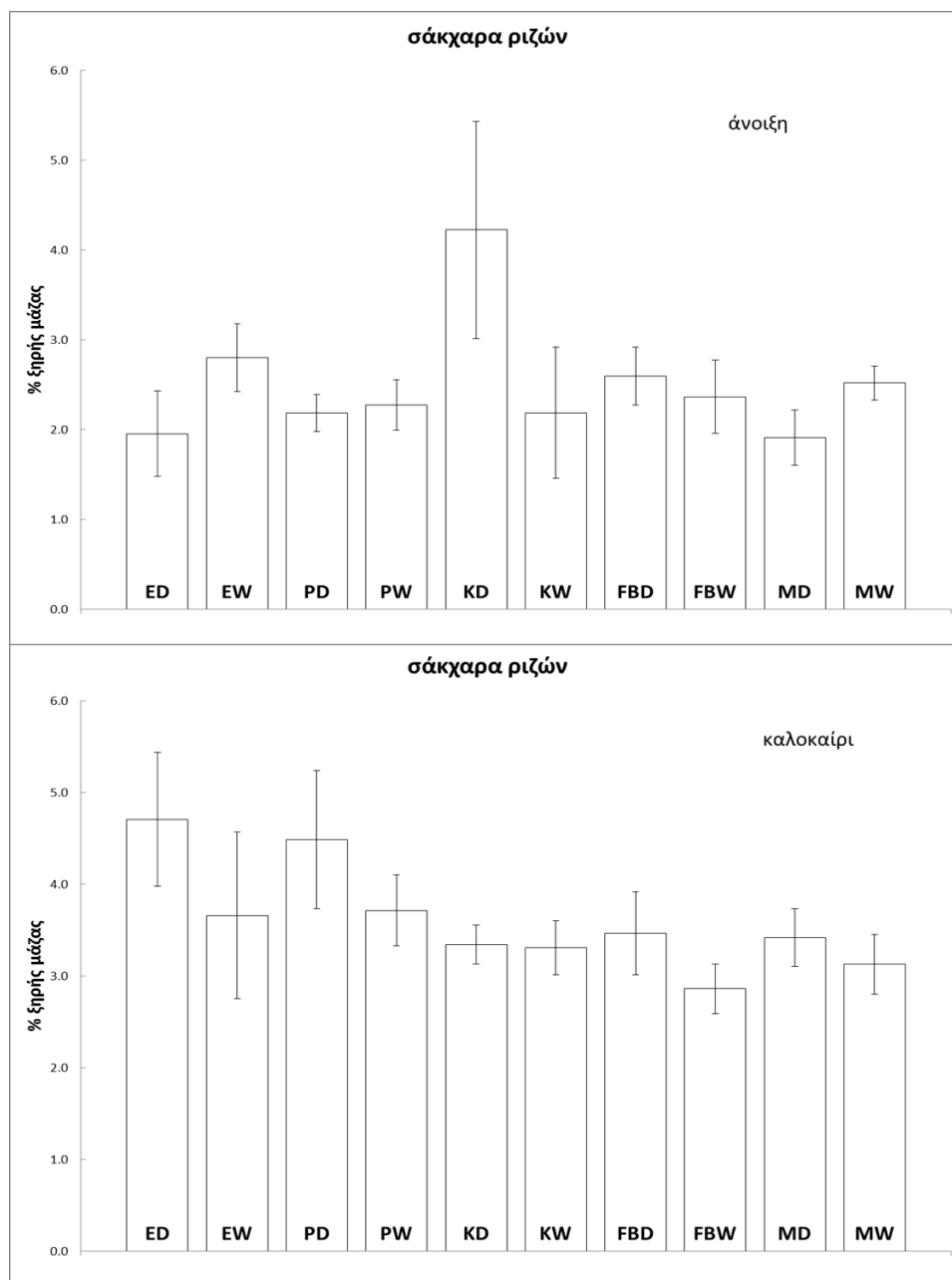
Διάγραμμα 4.5: Συγκέντρωση NSC ξυλώματος κλαδιών σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Στο Διάγραμμα 4.5 παρουσιάζεται η συγκέντρωση NSC στο ξύλωμα των κλαδιών. Στον υγρό βιότοπο της Πάτρας παρουσιάζεται μεγάλη συγκέντρωση την άνοιξη με όμως πολύ μεγάλο τυπικό σφάλμα. Επίσης η περιοχή της Ελευσίνας παρουσιάζει υψηλή συγκέντρωση NSC στο ξύλωμα κλαδιών κατά το καλοκαίρι που εμφανίζεται στατιστικώς σημαντική.



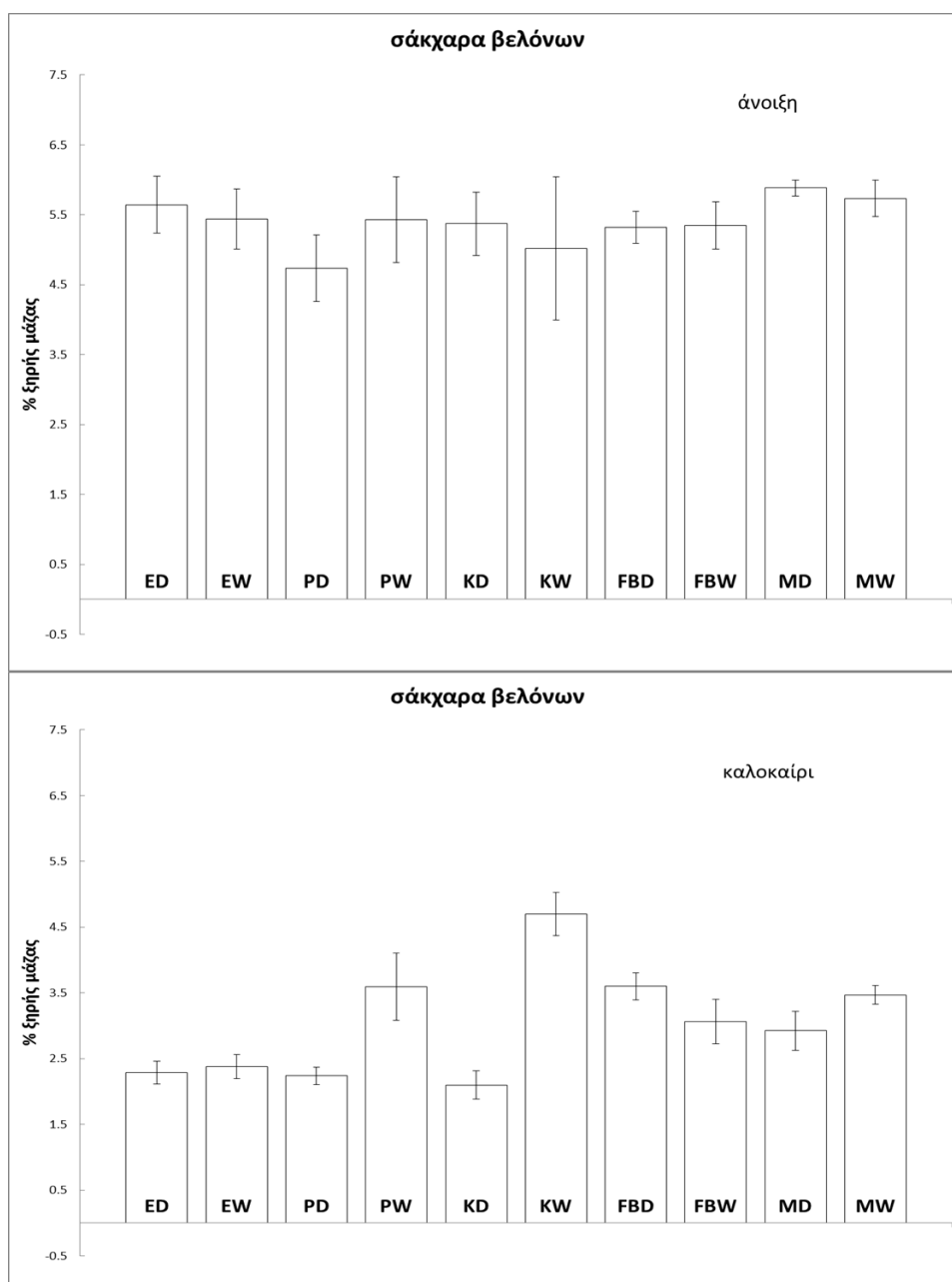
Διάγραμμα 4.6: Συγκέντρωση σακχάρων ξυλώματος κορμού σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W=Υγρότερος βιότοπος.

Στο Διάγραμμα 4.6 φαίνεται πως το ξύλωμα του κορμού για τα δέντρα στην περιοχή της Ελευσίνας έχει περισσότερα σάκχαρα από της άλλες περιοχές τόσο την άνοιξη όσο και το καλοκαίρι. Ξεχωρίζει επίσης ο υγρός βιότοπος της Κυλλήνης, το καλοκαίρι με πολύ μεγάλο ποσοστό σακχάρων αλλά και σχετικώς μεγάλο τυπικό σφάλμα.



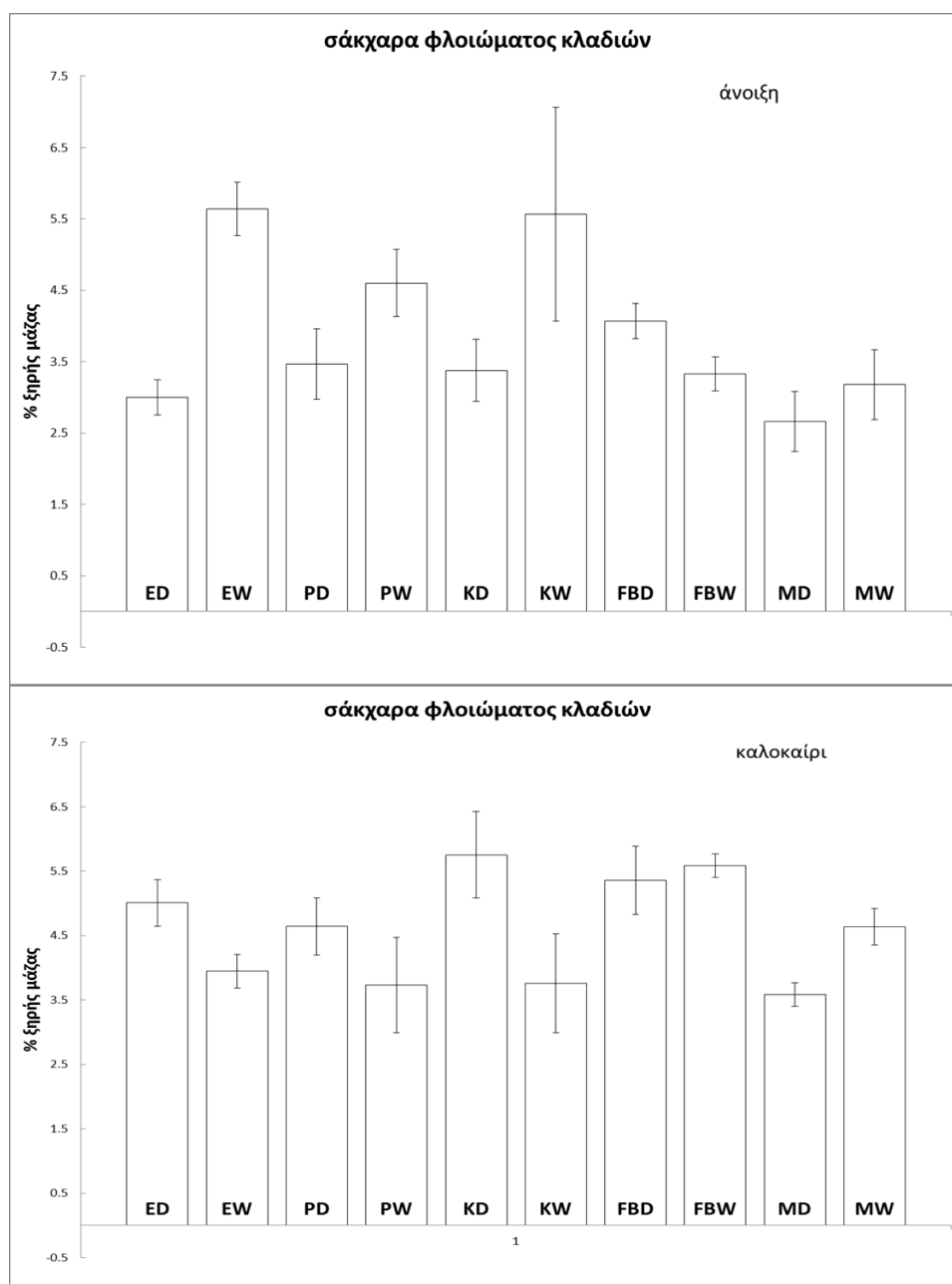
Διάγραμμα 4.7: Συγκέντρωση σακχάρων ριζών σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Στην περιοχή της Κυλλήνης, οι ρίζες των δέντρων παρουσιάζουν μεγάλες ποσότητες σακχάρων την άνοιξη σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.7 με όμως πολύ μεγάλο τυπικό σφάλμα, ενώ οι υπόλοιπες περιοχές παρουσιάζουν παρόμοια ποσοστά. Το καλοκαίρι υπάρχουν αυξημένες τιμές στις περιοχές της Ελλάδας, Ελευσίνα και Πάτρα. Στατιστικώς σημαντική φαίνεται να είναι η αύξηση των σακχάρων στις περισσότερες περιοχές το καλοκαίρι σε σχέση με την άνοιξη.



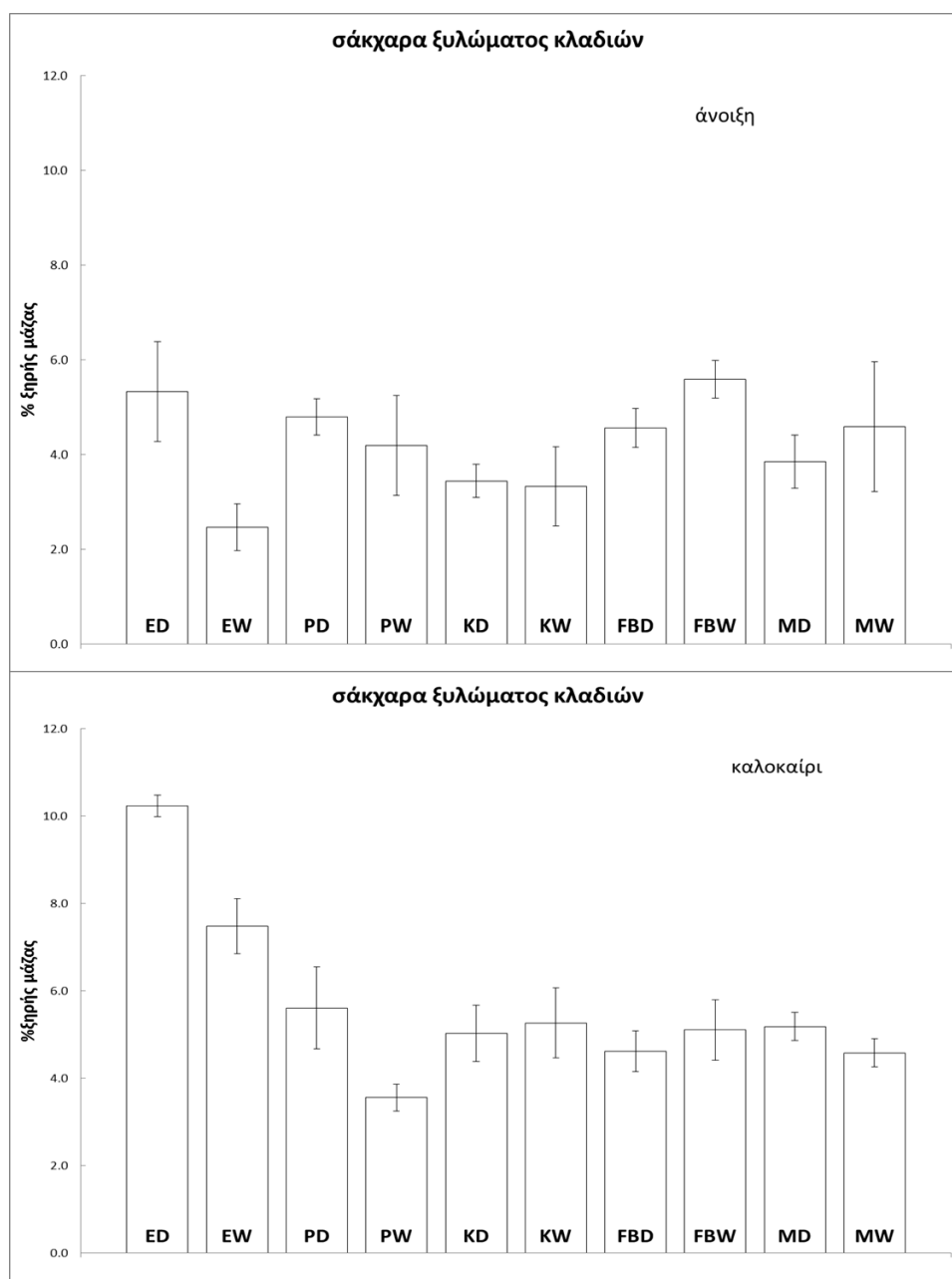
Διάγραμμα 4.8: Συγκέντρωση σακχάρων βελόνων σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Τα σάκχαρα στις βελόνες κυμαίνονται στα ίδια ποσοστά για όλες τις περιοχές την άνοιξη σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.8, ενώ το καλοκαίρι οι περιοχές της Γαλλίας κυμαίνονται σε υψηλότερες τιμές όπως επίσης στους υγρούς βιότοπους της Κυλλήνης και της Πάτρας. Στατιστικώς σημαντική φαίνεται να είναι η μείωση των σακχάρων στις βελόνες, στις περισσότερες περιοχές το καλοκαίρι σε σχέση με την άνοιξη.



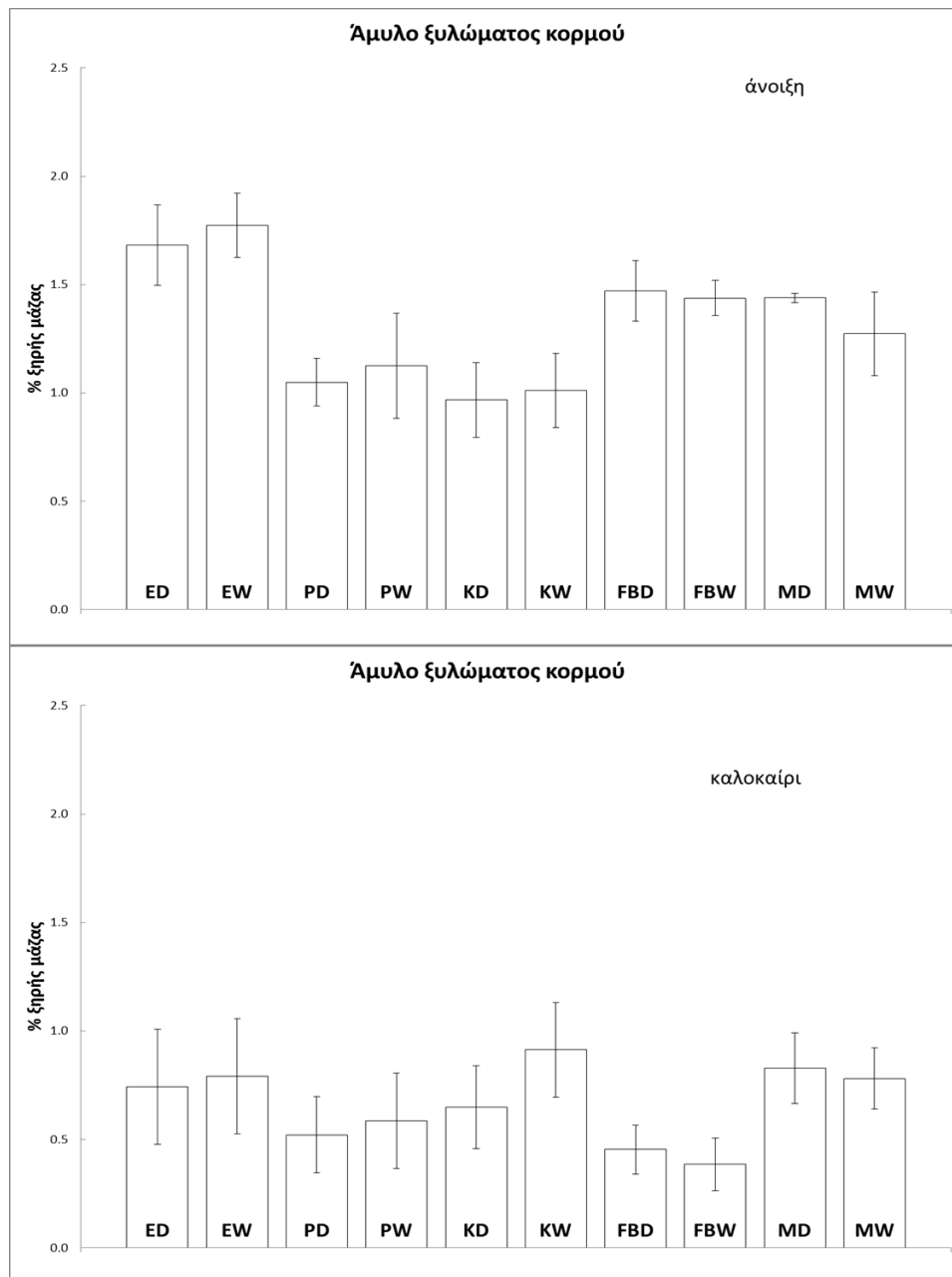
Διάγραμμα 4.9: Συγκέντρωση σακχάρων φλοιώματος κλαδιών σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Στο Διάγραμμα 4.9 παρατηρείται αύξηση των σακχάρων στο φλοιώμα των κλαδιών στους υγρούς βιοτόπους της Ελευσίνας και της Κυλλήνης για την περίοδο της άνοιξης, ενώ το καλοκαίρι παρατηρείται μια αύξηση των σακχάρων στο ξηρό βιότοπο κάθε περιοχής σε σύγκριση με τον υγρό βιότοπο κάθε περιοχής, με εξαίρεση τις περιοχές της Γαλλίας. Στα δένδρα της Saint-Mitre παρατηρείται το αντίθετο.



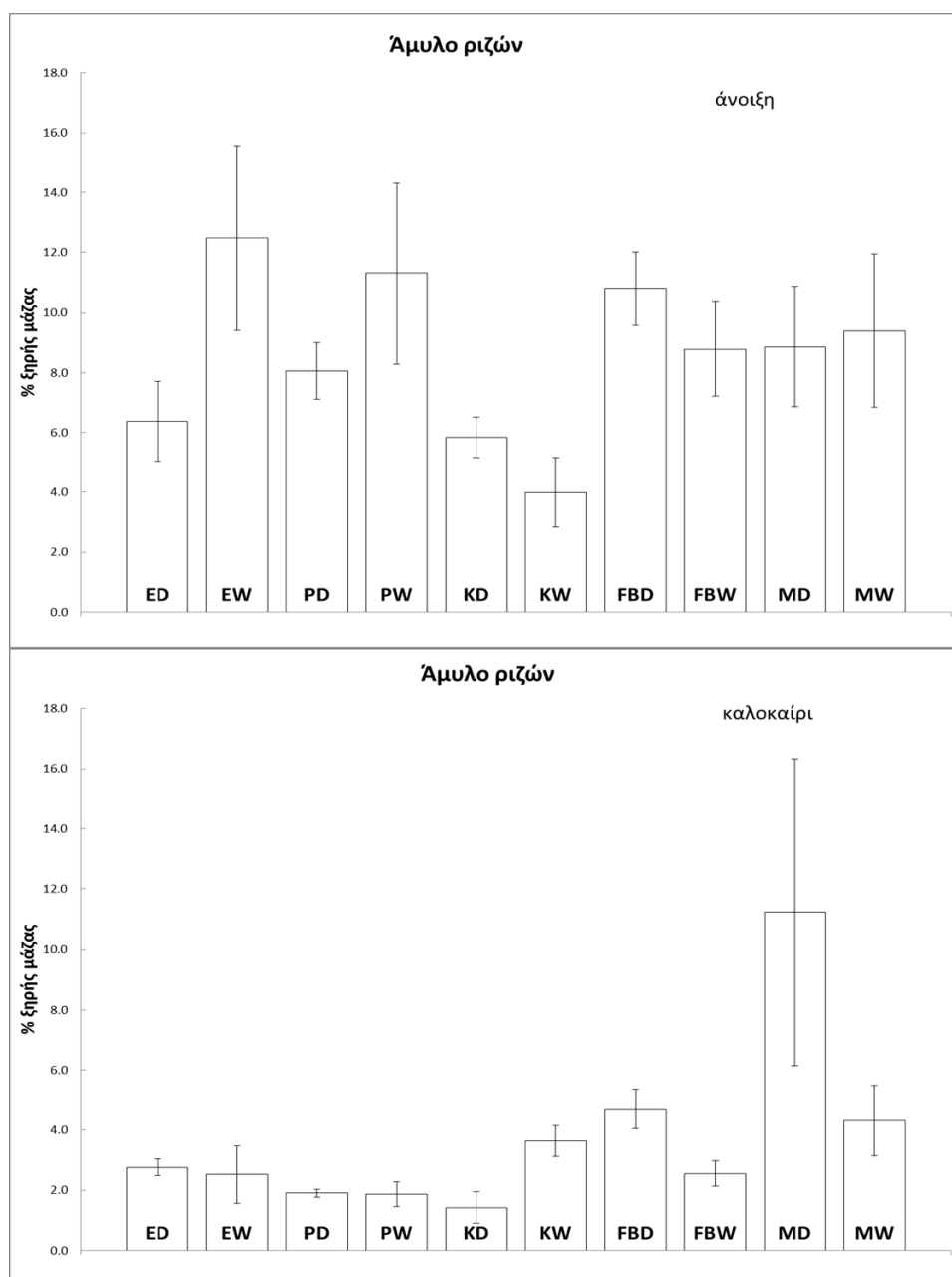
Διάγραμμα 4.10: Συγκέντρωση σακχάρων ξυλώματος κλαδιών σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W=Υγρότερος βιότοπος.

Στο ξύλωμα των κλαδιών οι τιμές των σακχάρων για την άνοιξη σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.10 βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο περίπου για όλες τις περιοχές με εξαίρεση τον υγρό βιότοπο της Ελευσίνας, ενώ για το καλοκαίρι ξεχωρίζουν οι δύο βιότοποι της Ελευσίνας με στατιστικώς σημαντικά μεγαλύτερα ποσοστά σακχάρων.



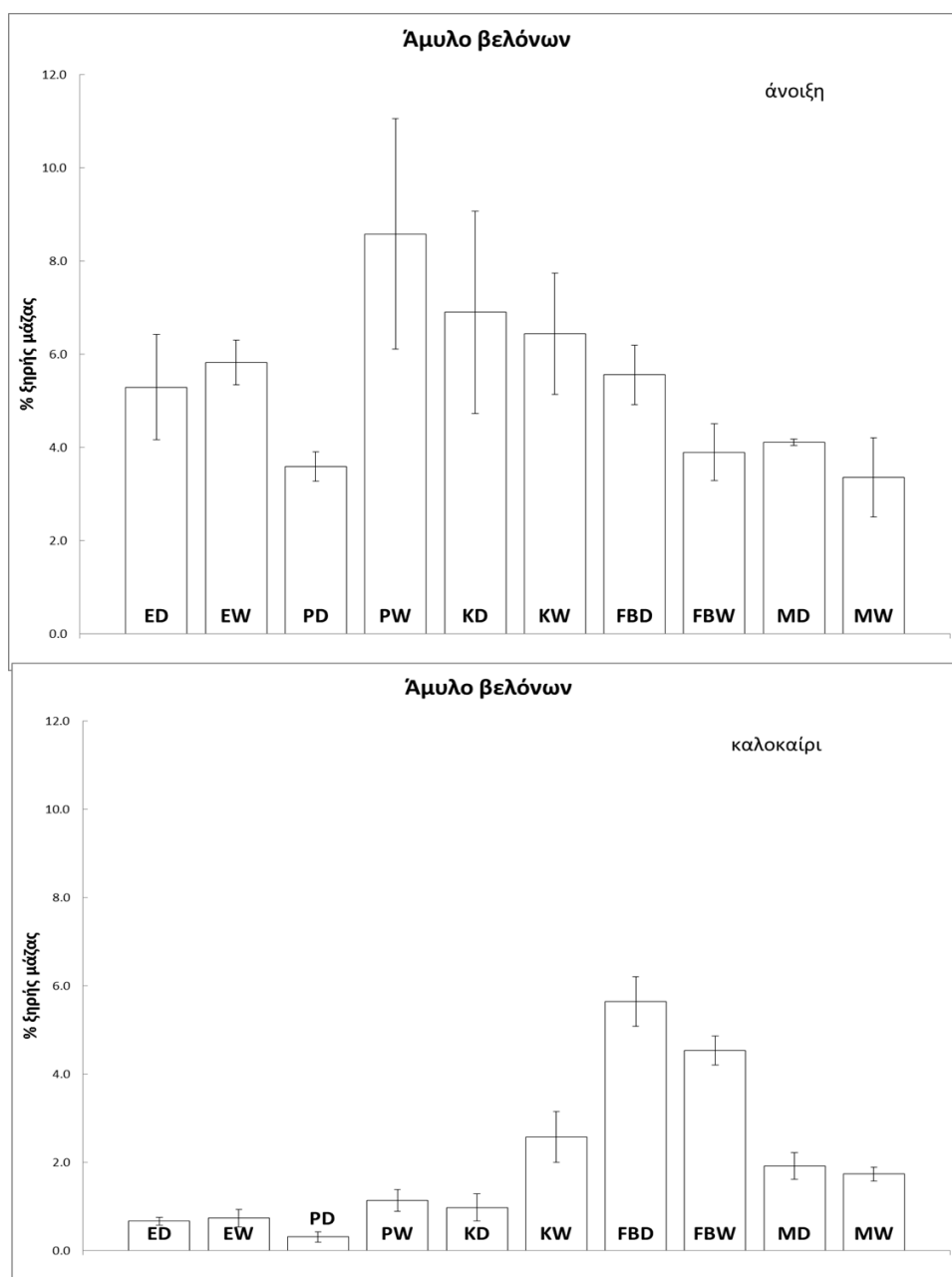
Διάγραμμα 4.11: Συγκέντρωση αμύλου ξυλώματος κορμού σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 4.11 το ξύλωμα του κορμού για την περιοχή της Ελευσίνας την άνοιξη παρουσιάζει σχετικά αυξημένες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές ενώ το καλοκαίρι οι τιμές αμύλου είναι πολύ μικρότερες για όλες τις περιοχές.



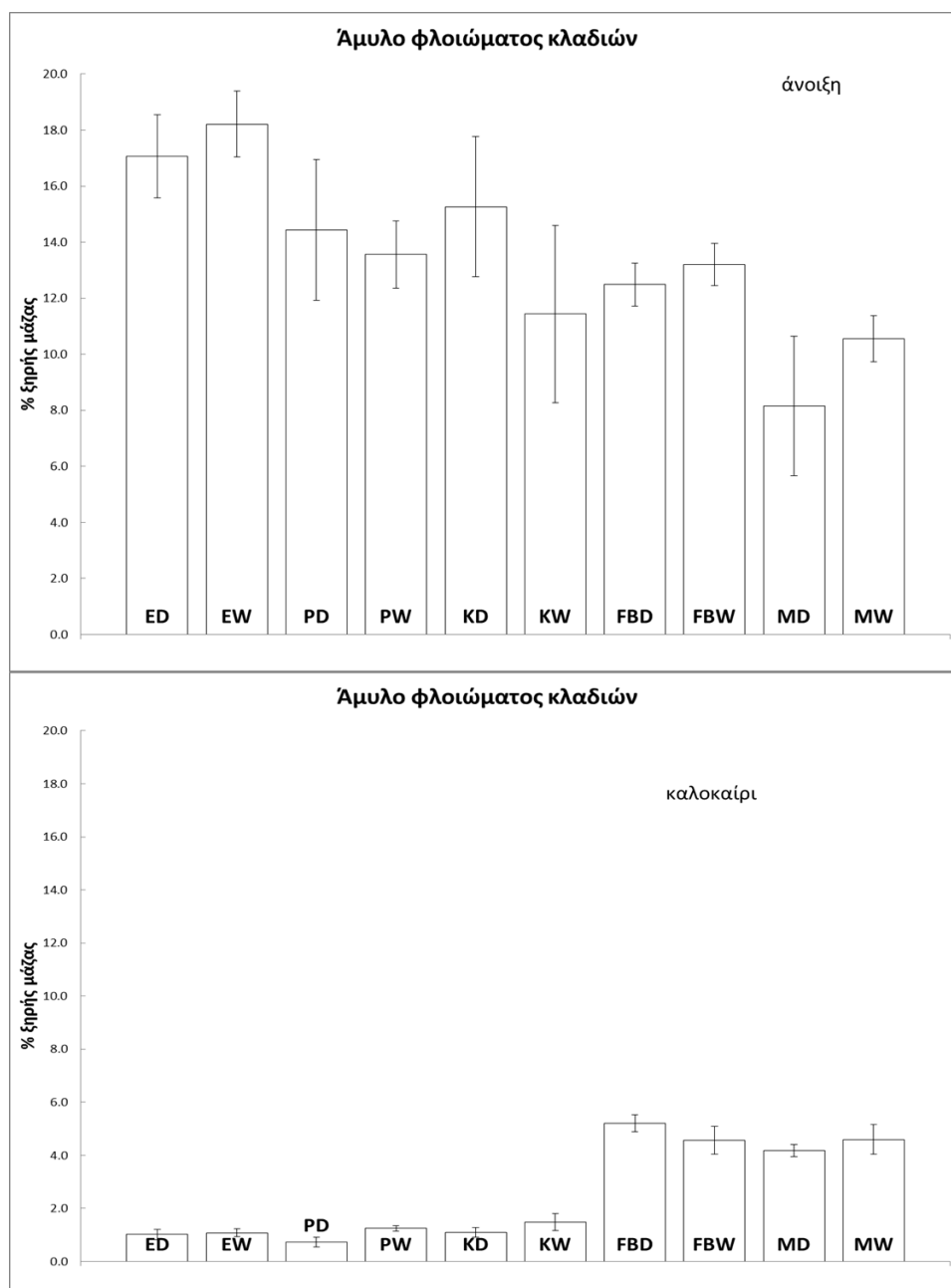
Διάγραμμα 4.12: Συγκέντρωση αμύλου ριζών σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Στο Διάγραμμα 4.12 παρατηρούνται για την άνοιξη, στην περιοχή της Κυλλήνης χαμηλότερες τιμές του αμύλου στις ρίζες, ενώ το καλοκαίρι παρατηρείται γενικά για όλες τις περιοχές πολύ χαμηλότερες τιμές αμύλου στις ρίζες σε σχέση με την άνοιξη, με εξαίρεση την περιοχή Saint-Mitre που παρουσιάζει μια μεγάλη αύξηση αμύλου αλλά με πολύ μεγάλο τυπικό σφάλμα.



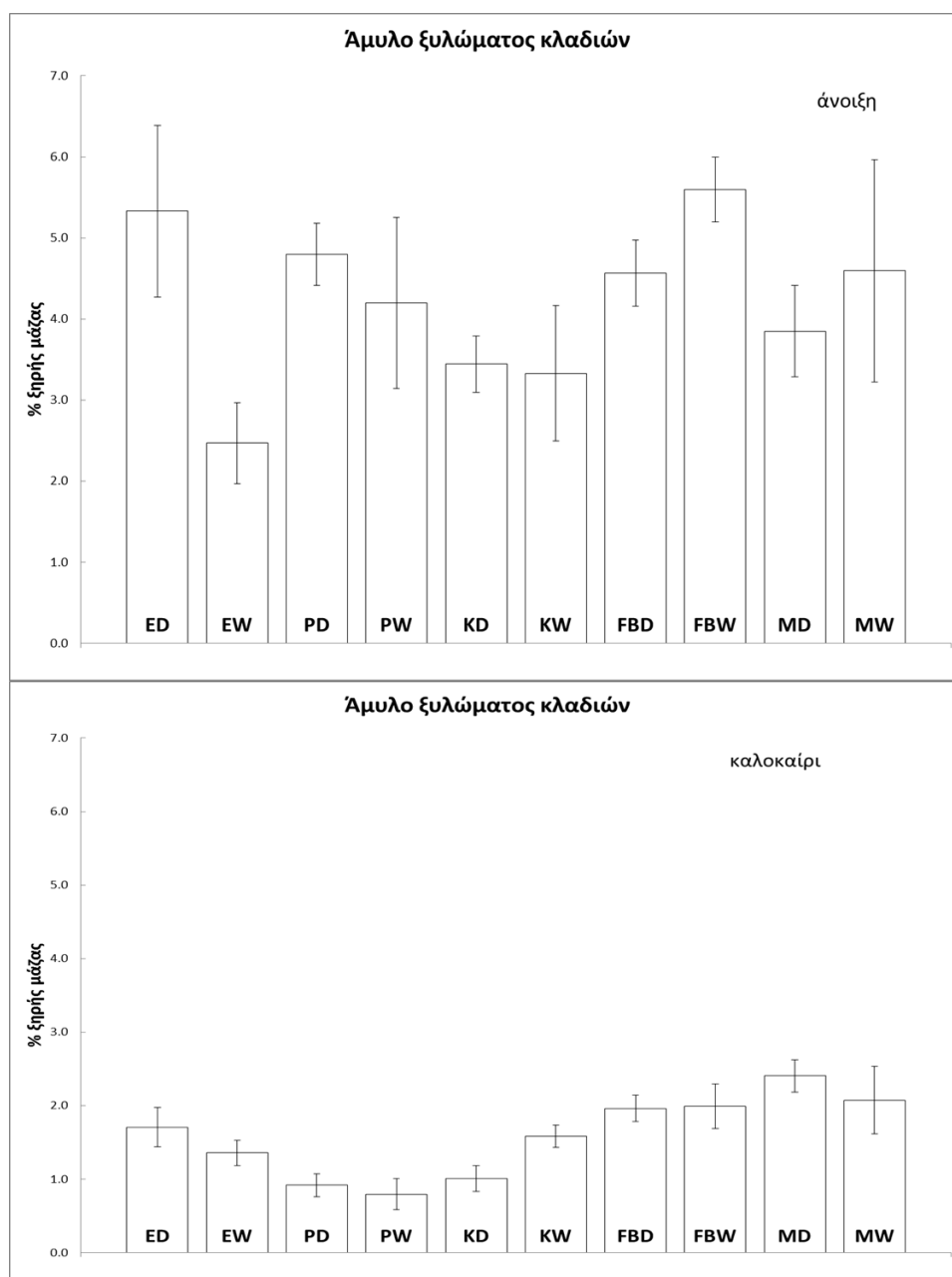
Διάγραμμα 4.13: Συγκέντρωση αμύλου βελόνων σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 4.13 οι περιοχές της Ελλάδας, Πάτρα και Κυλλήνη παρουσιάζουν μεγάλες τιμές συγκέντρωσης αμύλου την άνοιξη αλλά με μεγάλα τυπικά σφάλματα, ενώ το καλοκαίρι στους ξηρότερους βιοτόπους η συγκέντρωση αμύλου στις βελόνες είναι στατιστικώς πολύ μικρότερη. Επίσης παρατηρείται στατιστικώς σημαντική μείωση σχεδόν σε όλους του βιοτόπους το καλοκαίρι σε σχέση με την άνοιξη.



Διάγραμμα 4.14: Συγκέντρωση αμύλου φλοιώματος κλαδιών σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Στο Διάγραμμα 4.14 παρατηρείται μεγάλη συγκέντρωση αμύλου στο φλοιόμα των κλαδιών για στις ξηρότερες περιοχές της Ελλάδας και κυρίως στην Ελευσίνα, ενώ η χαμηλότερη συγκέντρωση παρουσιάζεται στην περιοχή Saint-Mitre. Το καλοκαίρι οι συγκεντρώσεις κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα για την Ελλάδα και υψηλότερα για την Γαλλία. Επίσης παρατηρείται στατιστικώς σημαντική μείωση σε όλους του βιοτόπους το καλοκαίρι σε σχέση με την άνοιξη.

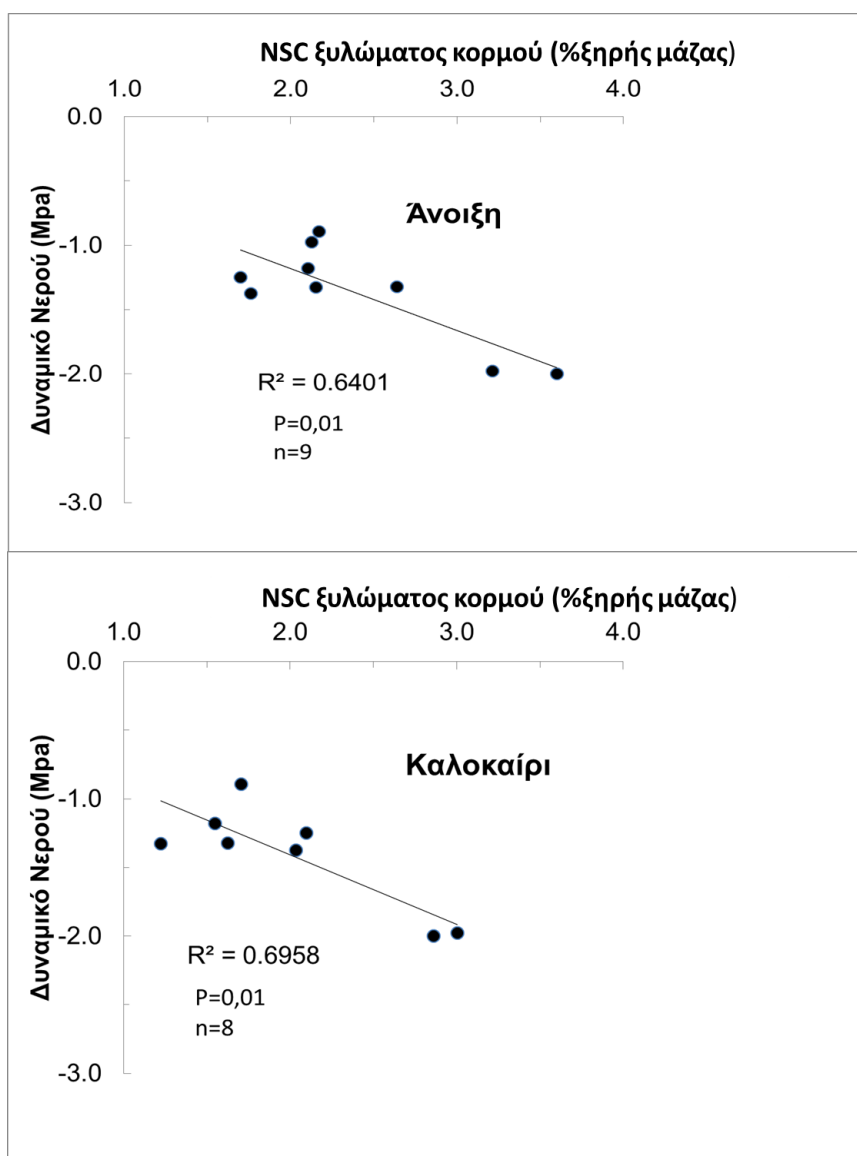


Διάγραμμα 4.15: Συγκέντρωση αμύλου ξυλώματος κλαδιών σε σχέση με το ποσοστό ξηρής μάζας για άνοιξη (φαινολογικό στάδιο 0.29-0.85) και καλοκαίρι με το τυπικό σφάλμα. E=Ελευσίνα, P= Πάτρα, K= Κυλλήνη, F=Font-Blanche, M= St. Mitre, D= Ξηρότερος, W= Υγρότερος βιότοπος.

Στο Διάγραμμα 4.15 παρουσιάζεται η συγκέντρωση αμύλου του ξυλώματος κλαδιών για την άνοιξη και το καλοκαίρι, στις περιοχές μελέτης. Για την άνοιξη οι διαφορές δεν είναι επί το πλείστον στατιστικώς σημαντικές, ενώ και το καλοκαίρι οι διαφορές κυρίως δεν είναι στατιστικώς σημαντικές αν διακρίνεται μια τάση οι υγρότεροι βιότοποι να έχουν και υψηλότερες συγκεντρώσεις αμύλου. Συγκριτικά άνοιξη και καλοκαίρι, το καλοκαίρι παρατηρούνται πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε στατιστικά σημαντικό βαθμό.

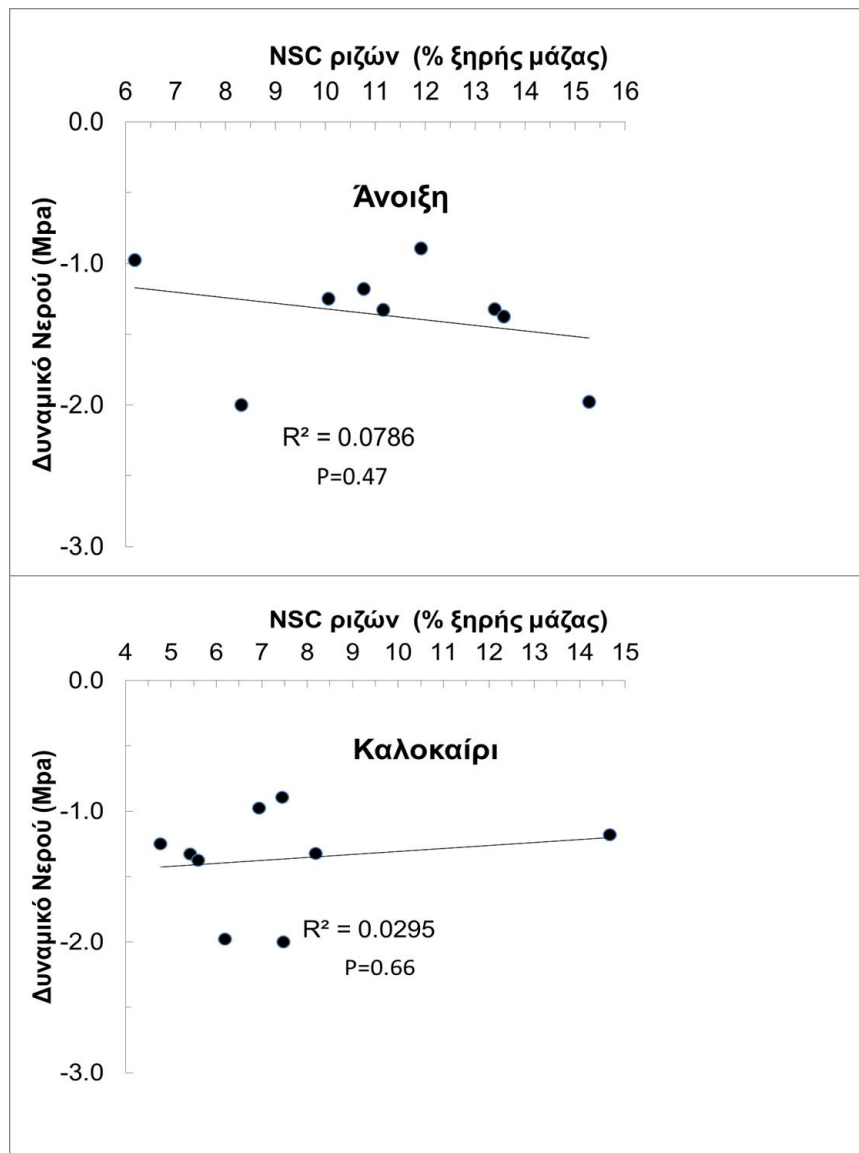
4.3 Συσχέτιση δυναμικού νερού και συγκέντρωσης μη δομικών υδατανθράκων των δένδρων ανά ιστό, περιοχή και εποχή

Γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων έτσι όπως προέκυψαν μετά την επεξεργασία και αφορούν την συσχέτιση του δυναμικού του νερού του ξυλώματος των κλαδιών πριν την αυγή στο τέλος του καλοκαιριού με τα ενεργειακά αποθέματα των δένδρων ανά ιστό, περιοχή και εποχή. Στόχος να εξακριβωθεί αν το υδατικό δυναμικό όπως μετρήθηκε ώστε να αποτελέσει δείκτης υδατικής καταπόνησης των δένδρων και ξηρότητας των βιοτόπων συσχετίζεται με αυξημένες ή μειωμένες συγκεντρώσεις NSC. Από τις μετρήσεις αυτές έχει αφαιρεθεί ο ξηρός βιότοπος της Πάτρας από όλα τα αποτελέσματα λόγω του περιορισμένου δείγματος ($n=3$), καθώς επίσης και ο υγρός βιότοπος της Κυλλήνης από τα αποτελέσματα που αφορούν το ξύλωμα του κορμού για το καλοκαίρι λόγω μεγάλου τυπικού σφάλματος.



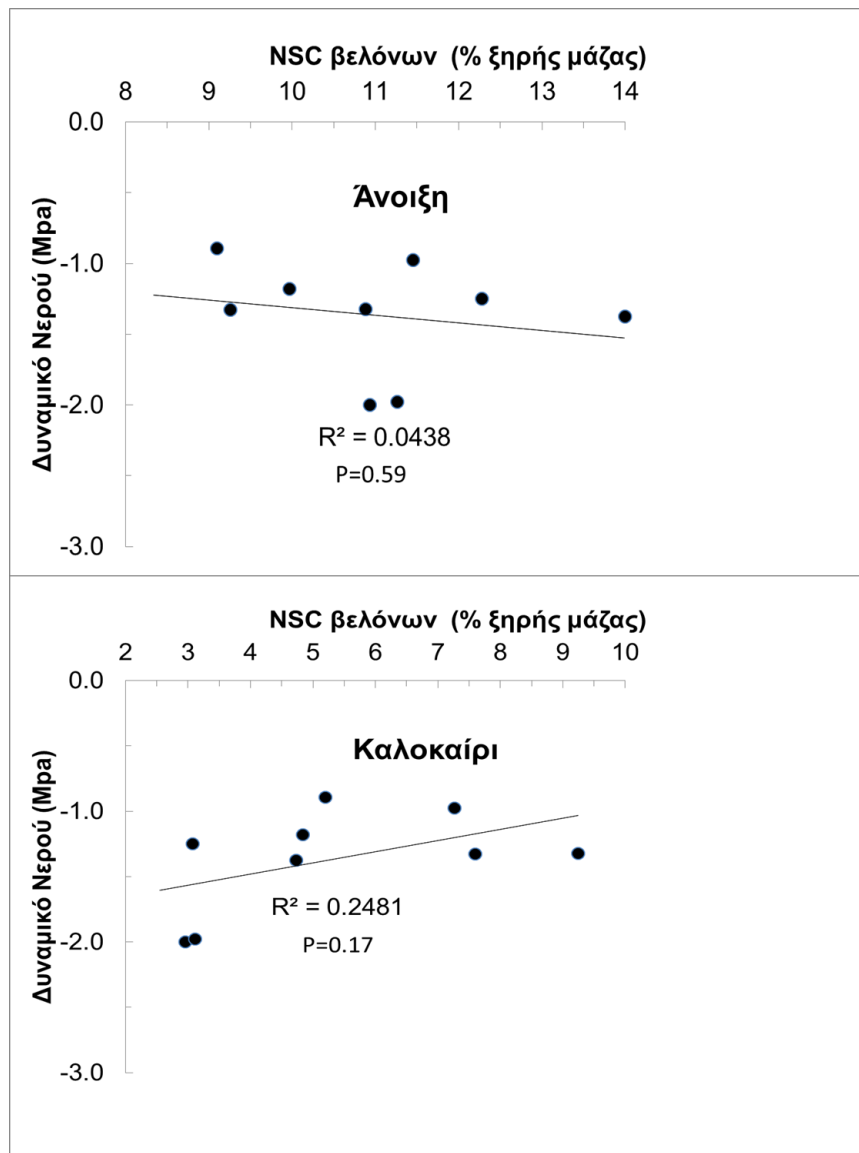
Διάγραμμα 4.16: Συσχέτιση NSC ξυλώματος κορμού με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=8).

Στο Διάγραμμα 4.16 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης NSC ξυλώματος κορμού και δυναμικού του νερού. Προκύπτει ότι η συγκέντρωση NSC ξυλώματος κορμού αυξάνεται όσο το δυναμικό του νερού μειώνεται. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι στατιστικά σημαντικός.



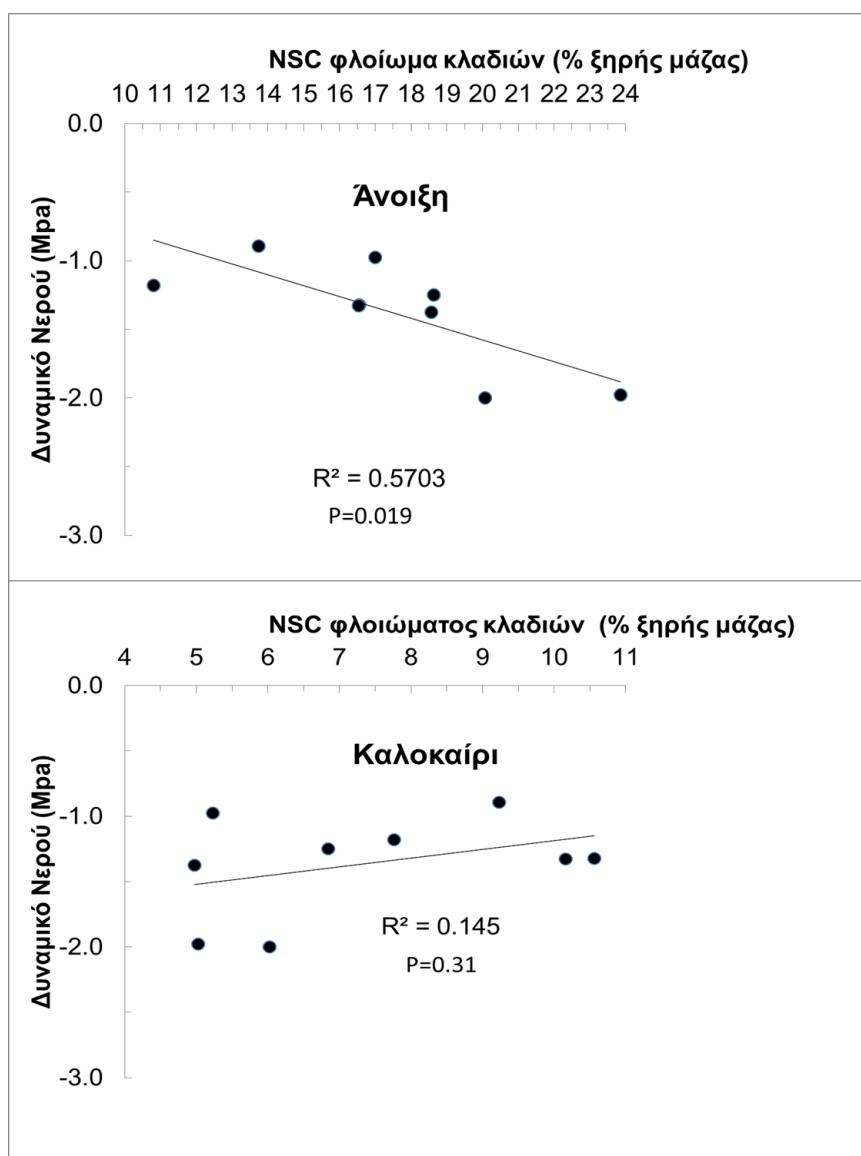
Διάγραμμα 4.17: Συσχέτιση NSC ριζών με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.17 φαίνεται πως η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης NSC στις ρίζες δεν είναι στατιστικά σημαντική για καμία από τις δύο εποχές.



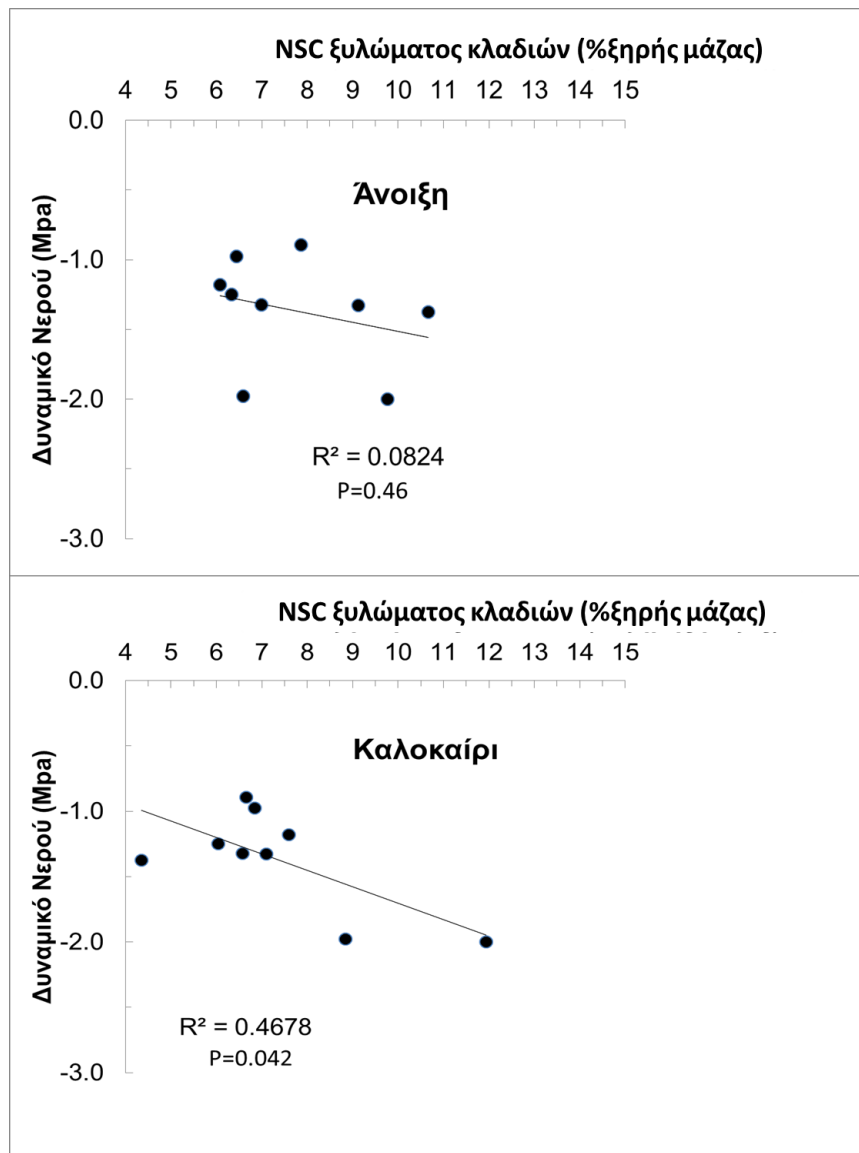
Διάγραμμα 4.18: Συσχέτιση NSC βελόνων με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9) .

Στο Διάγραμμα 4.18 φαίνεται πως η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης NSC στις βελόνες δεν είναι στατιστικά σημαντική για την άνοιξη, ενώ είναι κοντά σε στατιστικώς σημαντική συσχέτιση για το καλοκαίρι με τάση αύξησης της συγκέντρωσης NSC στις βελόνες στους πιο υγρούς βιοτόπους.



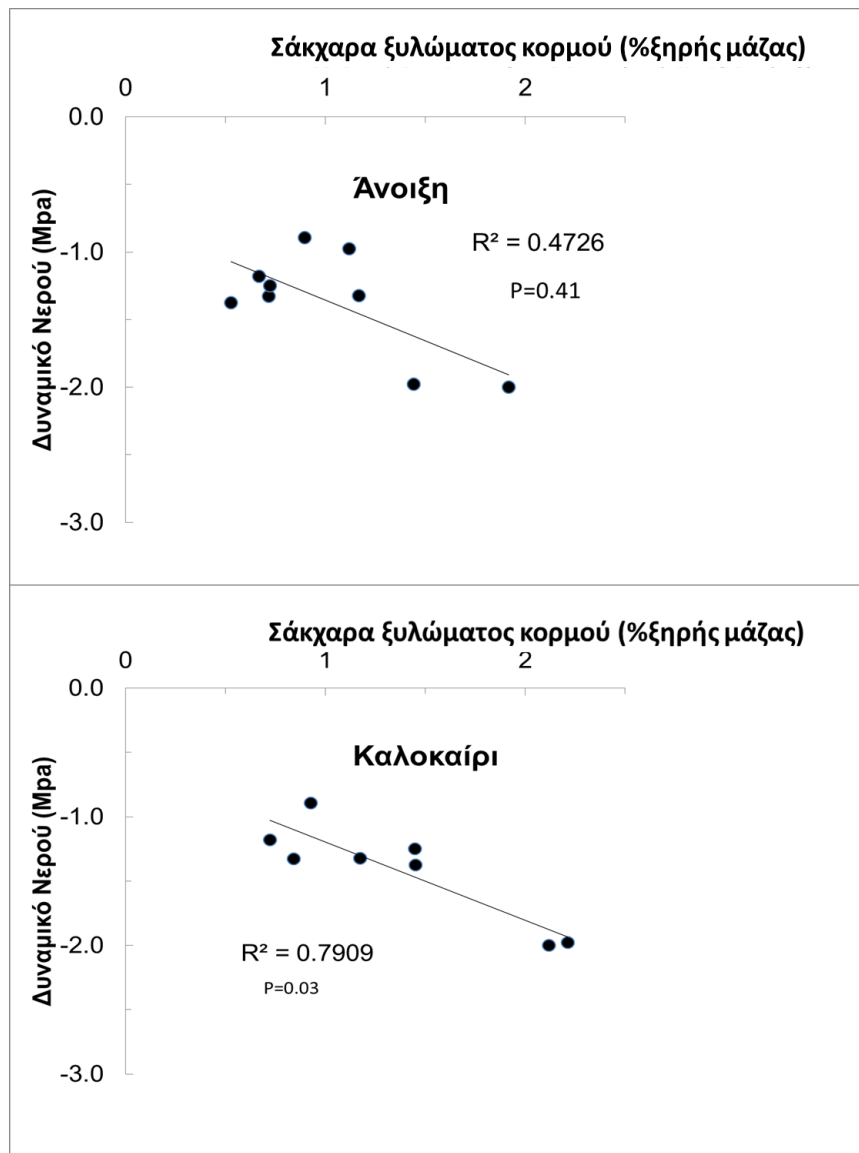
Διάγραμμα 4.19: Συσχέτιση NSC φλοιώματος κλαδιών με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.19 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης NSC φλοιώματος κλαδιών και δυναμικού του νερού. Προκύπτει για την άνοιξη ότι η συγκέντρωση NSC φλοιώματος κλαδιών αυξάνεται όσο το δυναμικό του νερού μειώνεται δηλαδή όσο πιο ξηροί γίνονται οι βιότοποι και είναι στατιστικά σημαντική. Η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης NSC στο φλοιώμα κλαδιών για το καλοκαίρι δεν είναι στατιστικώς σημαντική.



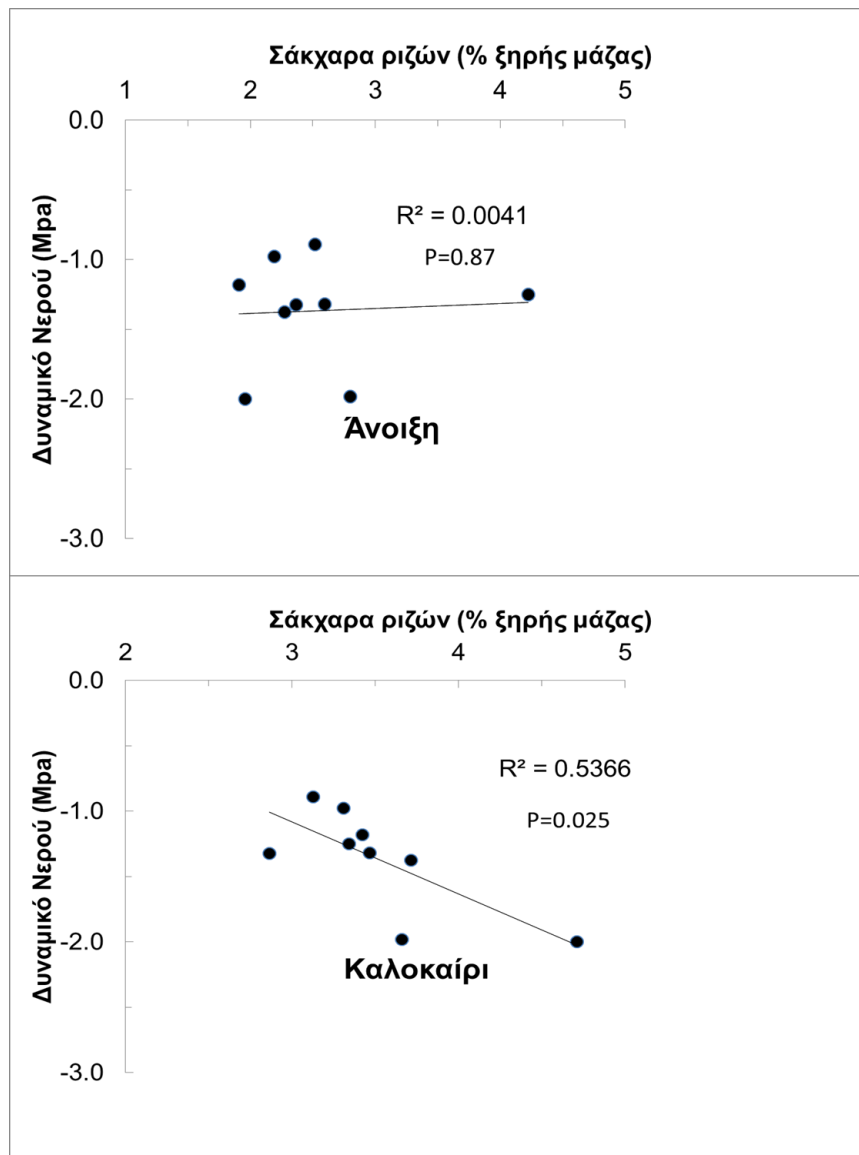
Διάγραμμα 4.20: Συσχέτιση NSC ξυλώματος κλαδιών με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.20 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης NSC ξυλώματος κλαδιών και δυναμικού του νερού. Προκύπτει ότι η συγκέντρωση NSC ξυλώματος κλαδιών αυξάνεται όσο το δυναμικό του νερού μειώνεται και συνεπώς η διαθεσιμότητα νερού μειώνεται για το καλοκαίρι. Όμως, η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης NSC στο ξύλωμα κλαδιών για την άνοιξη δεν είναι στατιστικά σημαντική.



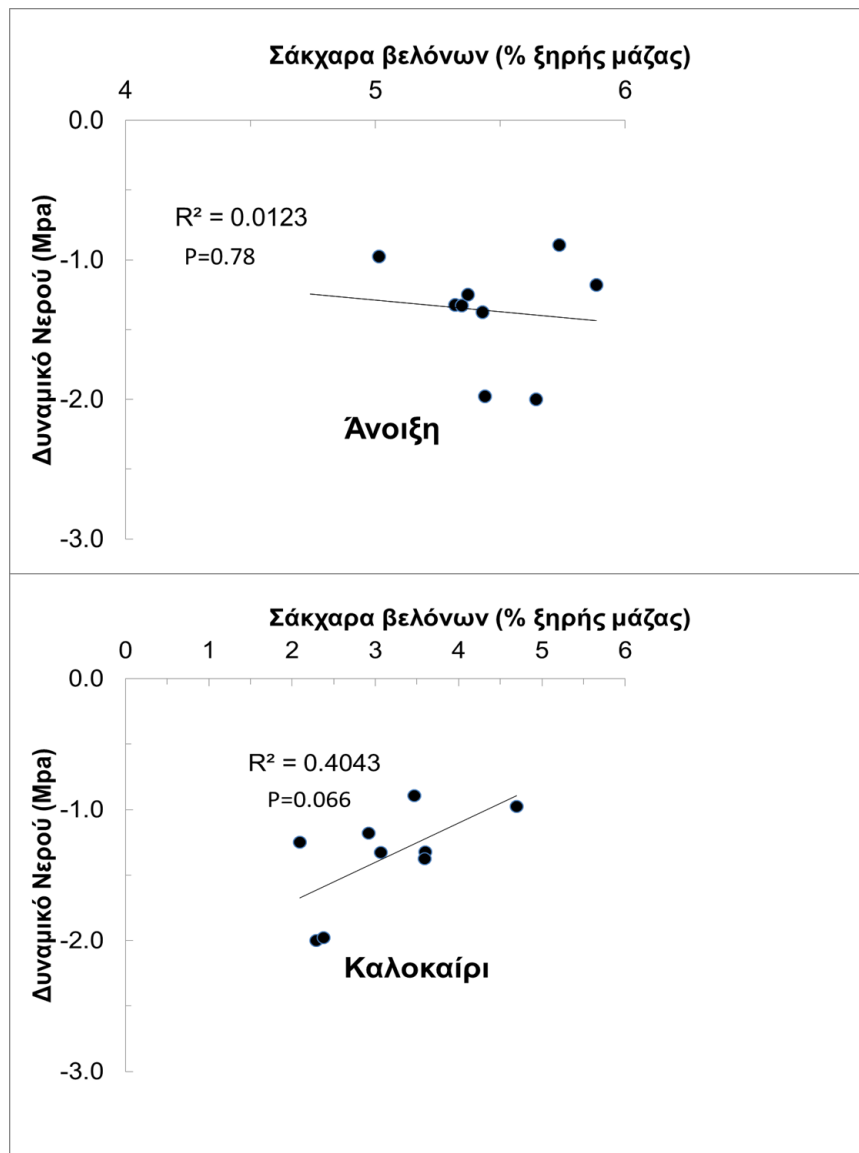
Διάγραμμα 4.21: Συσχέτιση σακχάρων ξυλώματος κορμού με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=8).

Στο Διάγραμμα 4.21 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης σακχάρων ξυλώματος κορμού και δυναμικού του νερού. Προκύπτει ότι η συγκέντρωση σακχάρων ξυλώματος κορμού αυξάνεται όσο το δυναμικό του νερού μειώνεται. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι στατιστικά σημαντικός.



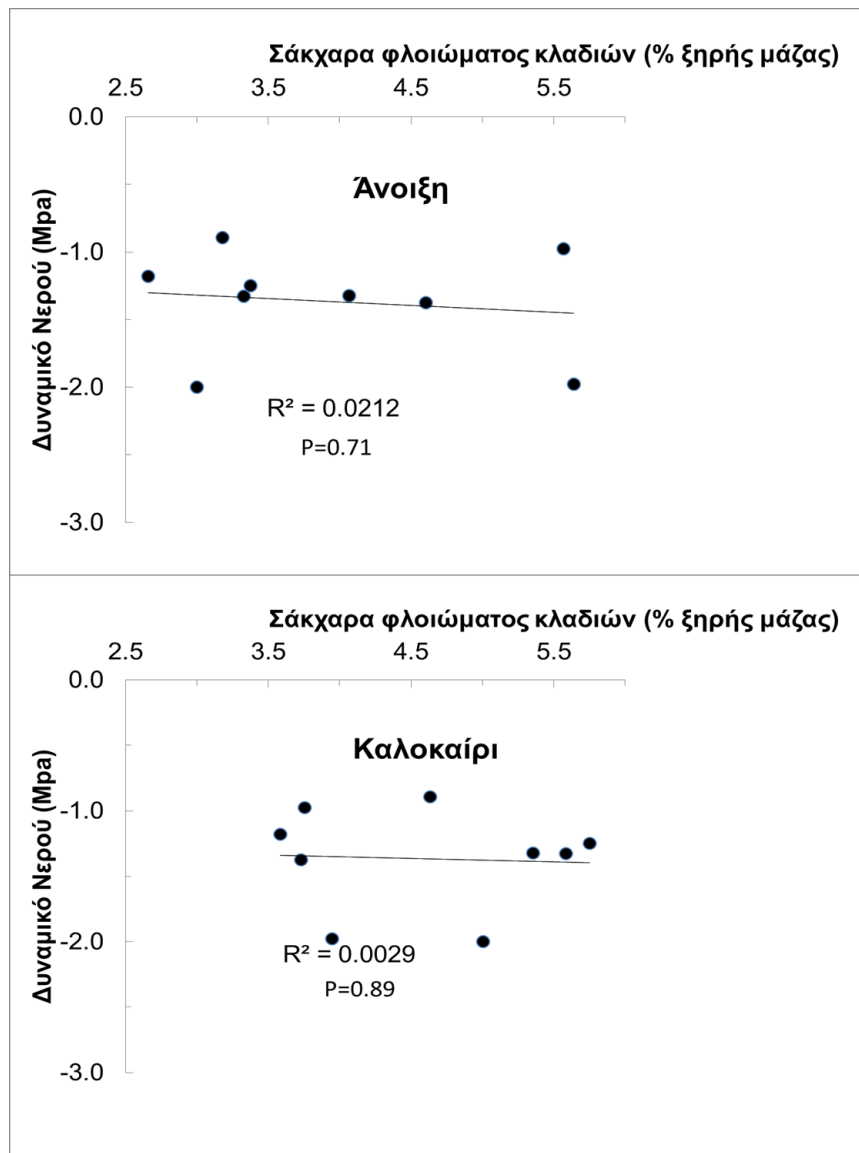
Διάγραμμα 4.22: Συσχέτιση σακχάρων ριζών με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.22 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης σακχάρων ριζών και δυναμικού του νερού. Προκύπτει ότι η συγκέντρωση σακχάρων ριζών αυξάνεται όσο το δυναμικό του νερού μειώνεται συνεπώς η διαθεσιμότητα νερού μειώνεται για το καλοκαίρι. Όμως, η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης σακχάρων στις ρίζες για την άνοιξη δεν είναι στατιστικώς σημαντική.



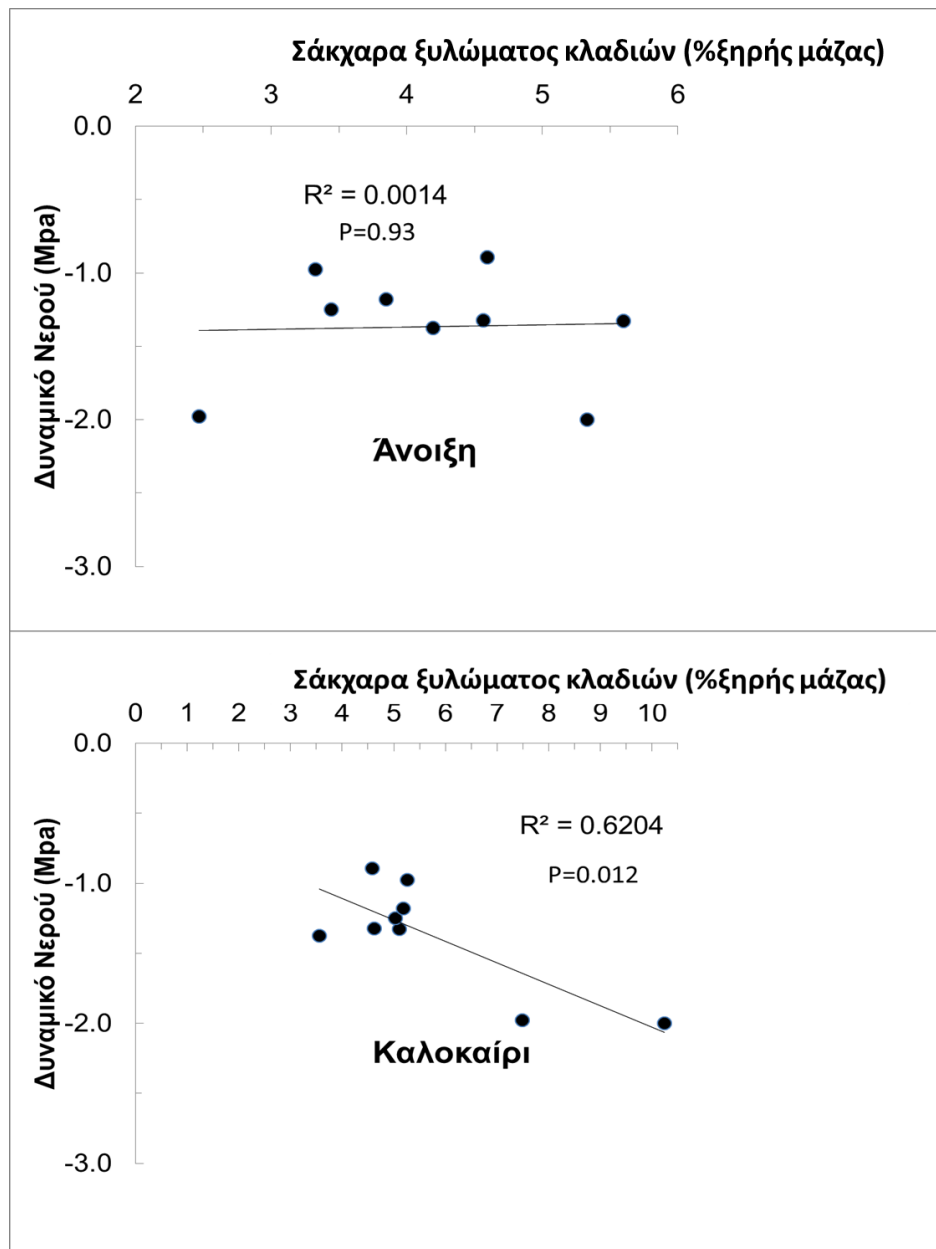
Διάγραμμα 4.23: Συσχέτιση σακχάρων βελόνων με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.23 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης σακχάρων των βελόνων και δυναμικού του νερού. Προκύπτει ότι η συγκέντρωση σακχάρων στις βελόνες μειώνεται όσο το δυναμικό του νερού αυξάνεται για το καλοκαίρι. Η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης σακχάρων στις βελόνες για το καλοκαίρι δεν είναι στατιστικώς σημαντική.



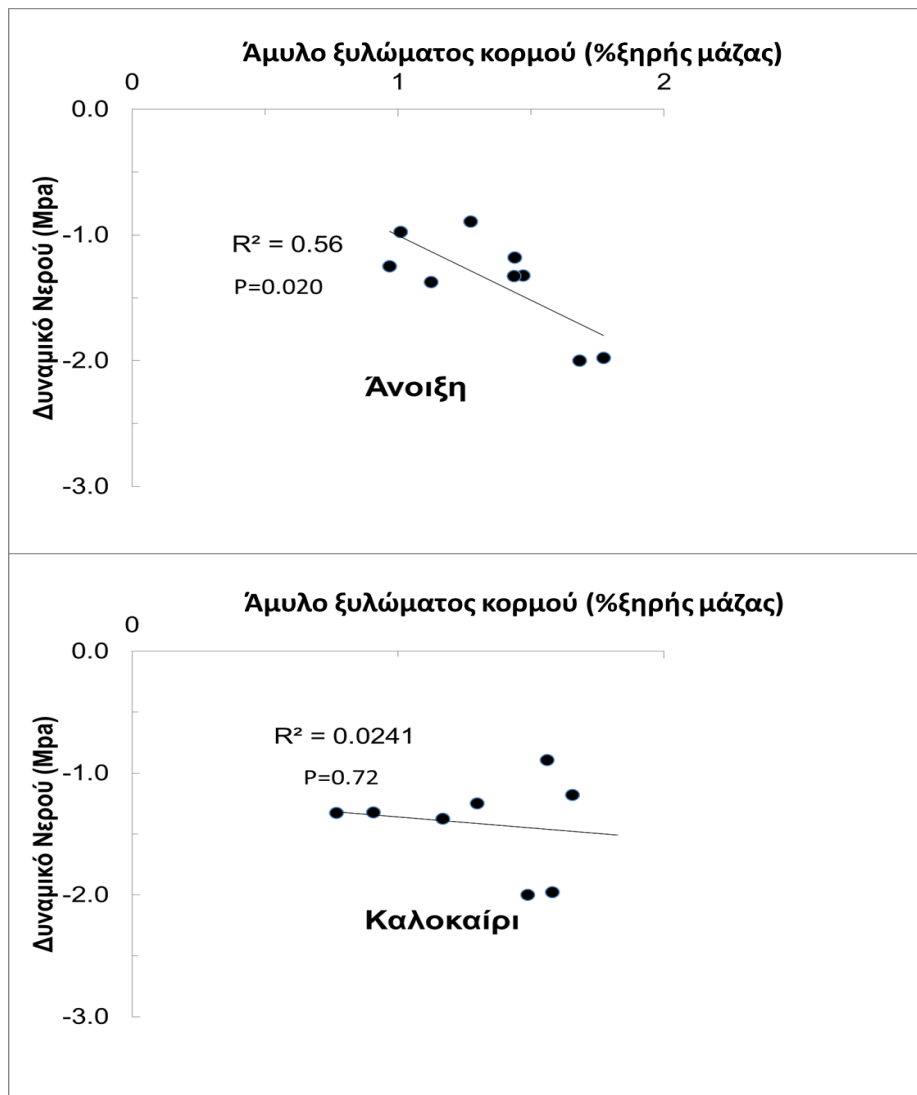
Διάγραμμα 4.24: Συσχέτιση σακχάρων φλοιώματος κλαδιών με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.24 φαίνεται πως η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης σακχάρων στο φλοιόωμα κλαδιού δεν είναι στατιστικά σημαντική για καμία από τις δύο εποχές.



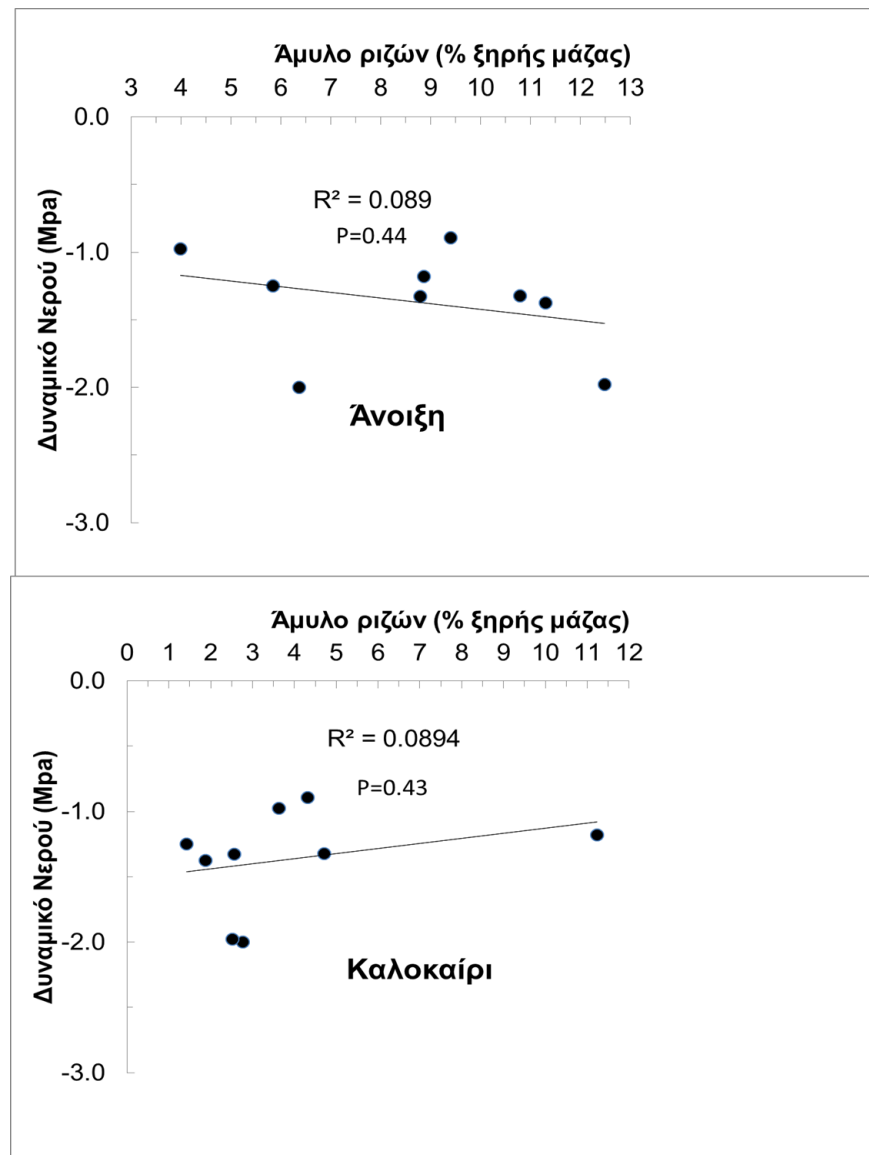
Διάγραμμα 4.25: Συσχέτιση σακχάρων ξυλώματος κλαδιών με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.25 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης σακχάρων ξυλώματος κλαδιών και δυναμικού του νερού. Προκύπτει ότι η συγκέντρωση σακχάρων ξυλώματος κλαδιών αυξάνεται όσο το δυναμικό του νερού μειώνεται δηλαδή όσο πιο ξηροί γίνονται οι βιότοποι και είναι στατιστικά σημαντική. Η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης σακχάρων στο ξύλωμα κλαδιών για το καλοκαίρι δεν είναι στατιστικώς σημαντική.



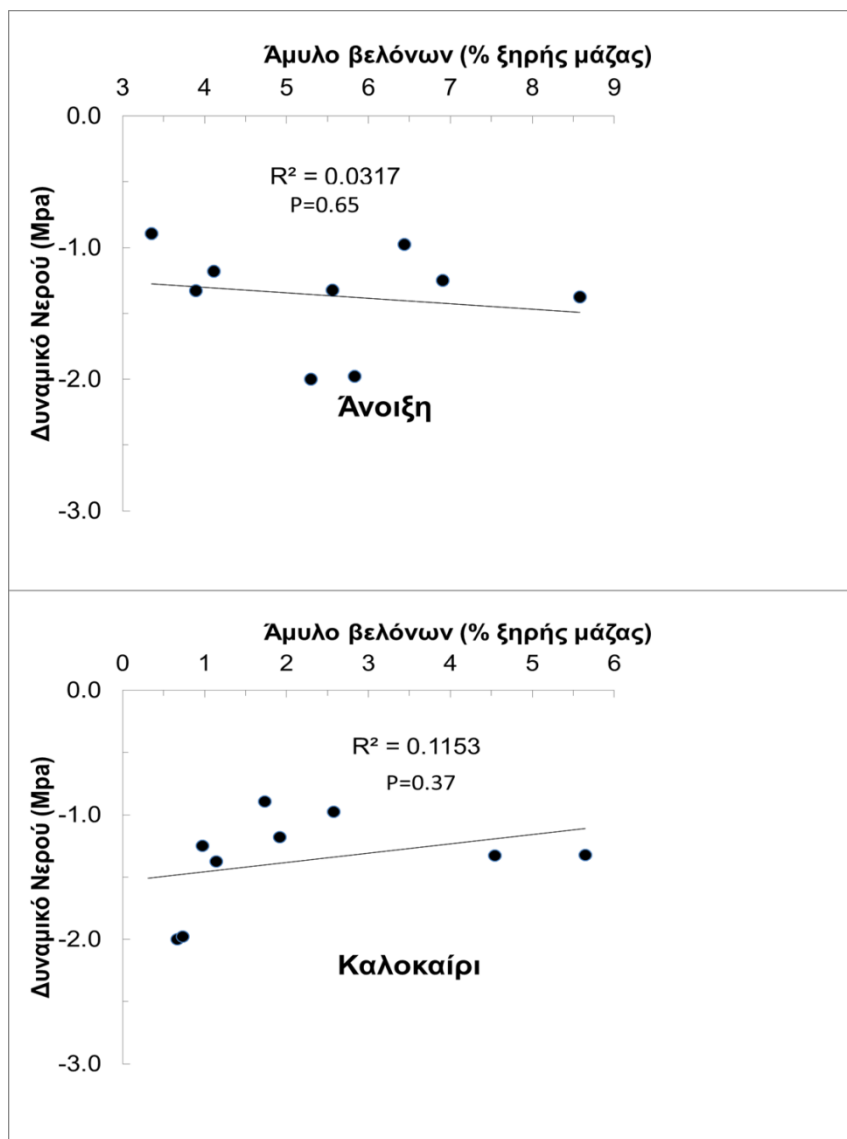
Διάγραμμα 4.26: Συσχέτιση αμύλου ξυλώματος κορμού με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=8).

Στο Διάγραμμα 4.26 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ συγκέντρωσης αμύλου ξυλώματος κορμού και δυναμικού του νερού. Προκύπτει ότι η συγκέντρωση αμύλου ξυλώματος κορμού αυξάνεται όσο το δυναμικό του νερού μειώνεται για την άνοιξη. Όμως, η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης αμύλου στο ξύλωμα του κορμού για την άνοιξη δεν είναι στατιστικά σημαντική.



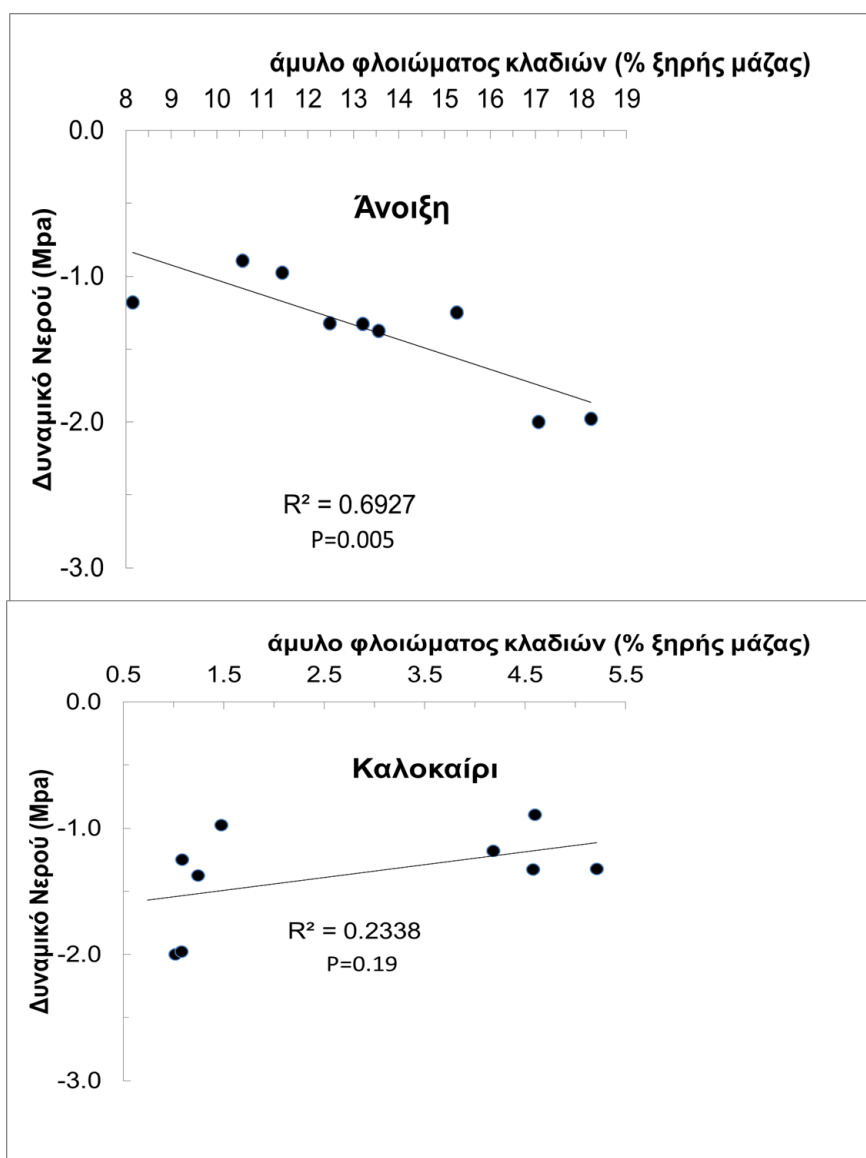
Διάγραμμα 4.27: Συσχέτιση αμύλου ριζών με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.27 φαίνεται πως η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης αμύλου στις ρίζες δεν είναι στατιστικά σημαντική για καμία από τις δύο εποχές.



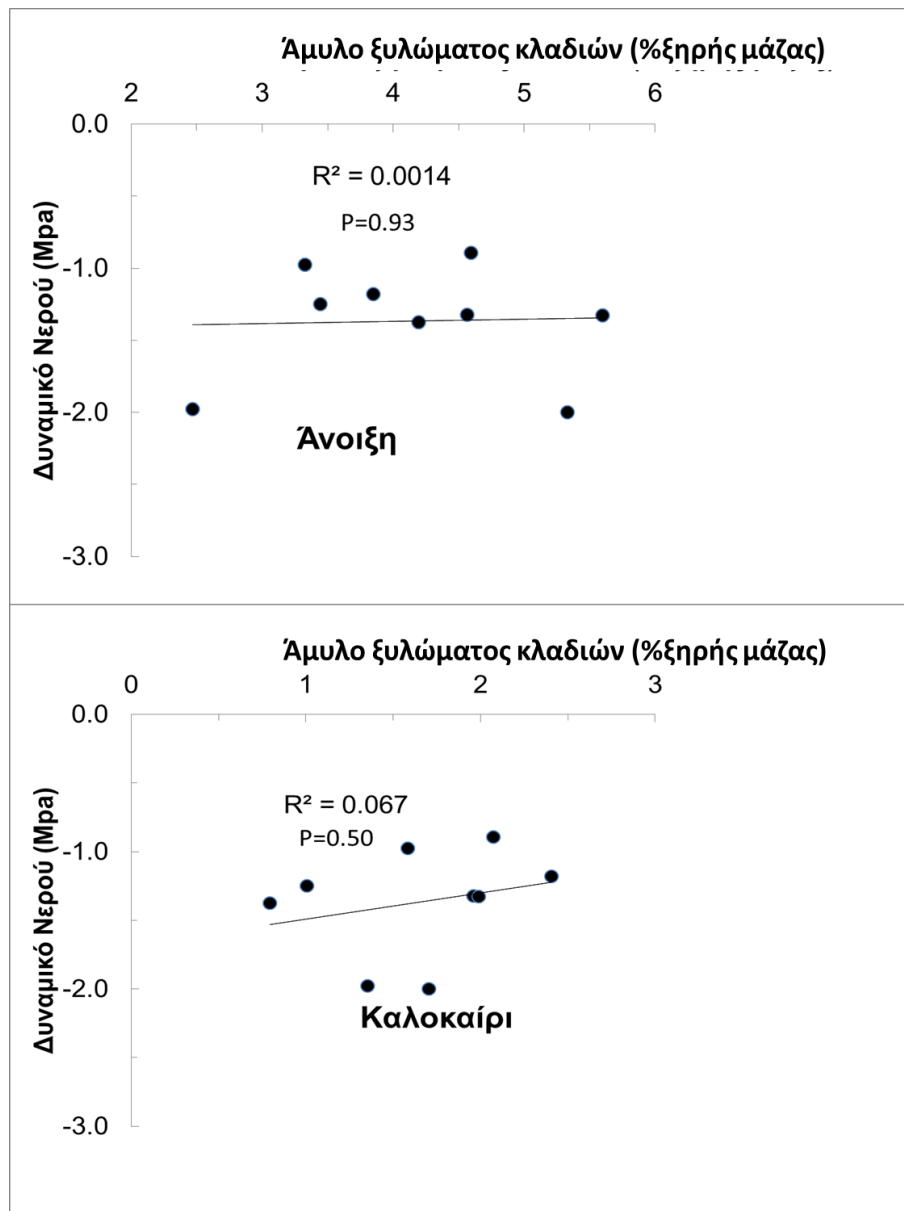
Διάγραμμα 4.28: Συσχέτιση αμύλου βελόνων με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.28 φαίνεται πως η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης αμύλου βελόνων δεν είναι στατιστικά σημαντική για την άνοιξη, ενώ είναι κοντά σε στατιστικώς σημαντική συσχέτιση για το καλοκαίρι με τάση αύξησης της συγκέντρωσης αμύλου στο φλοίωμα των κλαδιών στους πιο υγρούς βιοτόπους.



Διάγραμμα 4.29: Συσχέτιση φλοιώματος κλαδιών με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.29 φαίνεται πως η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης αμύλου στο φλοιόωμα κλαδιών δεν είναι στατιστικά σημαντική για την άνοιξη, ενώ είναι κοντά σε στατιστικώς σημαντική συσχέτιση για το καλοκαίρι με τάση αύξησης της συγκέντρωσης σακχάρων στο φλοιόωμα των κλαδιών στους πιο υγρούς βιοτόπους.



Διάγραμμα 4.30: Συσχέτιση αμύλου ξυλώματος κλαδιών με το δυναμικό νερού για άνοιξη (n=9) και για καλοκαίρι (n=9).

Στο Διάγραμμα 4.30 φαίνεται πως η συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού του νερού και της συγκέντρωσης αμύλου ξυλώματος κλαδιών δεν είναι στατιστικά σημαντική για καμία από τις δύο εποχές.

4.4 Συνολικά Αποτελέσματα

Τα συνολικά αποτελέσματα που προκύπτουν μετά την επεξεργασία των μετρήσεων δείχνουν ότι οι συγκεντρώσεις σε NSC και άμυλο είναι υψηλότερες την άνοιξη παρά το καλοκαίρι, ενώ οι συγκεντρώσεις σακχάρων είναι πιο υψηλές το καλοκαίρι παρά την άνοιξη με εξαίρεση την συγκέντρωση σακχάρων στις βελόνες όπου παρατηρείται το αντίθετο. Η Ελευσίνα που αποτελεί και το ξηρότερο βιότοπο παρουσιάζει συνεχώς τις υψηλότερες τιμές όσον αφορά την συγκέντρωση σε NSC. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο χαρακτηριστικό στο ξύλωμα του κορμού, όπου παρουσιάζει μια μεγάλη συγκέντρωση NSC σε σχέση με τις άλλες περιοχές. Στο φλοιώμα των κλαδιών η συγκέντρωση NSC παρουσιάζει αυξημένες τιμές για την Ελλάδα σε σύγκριση με τη Γαλλία, για την άνοιξη, ενώ το καλοκαίρι παρουσιάζεται το αντίθετο. Όσον αφορά τα σάκχαρα, παρουσιάζονται μεγάλες συγκεντρώσεις στο ξύλωμα του κορμού για τις περιοχές της Ελλάδας σε σχέση με τις περιοχές της Γαλλίας. Και τέλος οι συγκεντρώσεις αμύλου είναι μεγαλύτερες το καλοκαίρι για τις περιοχές της Γαλλίας σε σύγκριση με της Ελλάδας.

Με βάση τις μετρήσεις του δυναμικού του νερού πριν την αυγή (pre-dawn) των κλαδιών των δένδρων που έγιναν στο τέλος του καλοκαιριού και την συσχέτισή τους με τους NSC προκύπτει ότι η συγκέντρωση σε αυτού του τύπου τα ενεργειακά αποθέματα αυξάνεται όσο το δυναμικό του νερού μειώνεται και άρα οι συνθήκες γίνονται ξηρότερες για τη διαβίωση των δένδρων. Αυτό παρατηρείται στις συγκεντρώσεις NSC ξυλώματος κορμού για άνοιξη και καλοκαίρι, στις συγκεντρώσεις NSC φλοιώματος κλαδιών της άνοιξης και στις συγκεντρώσεις NSC ξυλώματος κλαδιών για το καλοκαίρι. Επίσης εμφανίζεται στις συγκεντρώσεις σακχάρων ξυλώματος κορμού για άνοιξη και καλοκαίρι, στις συγκεντρώσεις σακχάρων στις ρίζες και στο ξύλωμα κλαδιών για το καλοκαίρι, καθώς και στις συγκεντρώσεις αμύλου στο ξύλωμα κορμού και στο φλοιώμα των κλαδιών την άνοιξη. Το μόνο διαφορετικό αποτέλεσμα έδειξαν οι συγκεντρώσεις σακχάρων στις βελόνες το καλοκαίρι που είναι αντίθετο με τα προαναφερόμενα αφού οι συγκεντρώσεις σακχάρων τείνουν να μειώνονται όσο μειώνεται και το δυναμικό νερού.

5. Συζήτηση

1. Στόχοι και αξιολόγηση του ερευνητικού σχεδιασμού

Η επιβίωση και παραγωγικότητα των φυτών εξαρτάται άμεσα από την διαθεσιμότητα σε υδάτινους πόρους και την απρόσκοπτη μεταφορά του νερού με στόχο τη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας της φωτοσύνθεσης και της αύξησης (Stiller, 2009). Για αυτό το λόγο η ξηρασία αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες αβιοτικής καταπόνησης που περιορίζει τη φυτική παραγωγή σε παγκόσμιο επίπεδο (Boyer, 1982), (Chaves et al., 2003), (Flexas et al., 2004).

Η δασική θνησιμότητα λόγω της επίδρασης της ξηρασίας είναι ένα αυξανόμενο παγκόσμιο πρόβλημα με ευρείες συνέπειες (Dickman et al., 2014). Υπάρχουν δύο υποθέσεις στη βιβλιογραφία που σχετίζονται με την εξασθένηση και απονέκρωση των δένδρων και αφορούν α) την σταδιακή «λιμοκτονία» λόγω έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων και β) την απονέκρωση των δένδρων λόγω ανεπάρκειας νερού για να υποστηρίξει τις υδραυλικές ανάγκες των φυτών (Körner, 2003), (McDowell et al., 2008).

Υδραυλική κατάρρευση εμφανίζεται όταν το δυναμικό νερού των φυτών πέσει κάτω από μια κρίσιμη τιμή, λόγω της συνδυασμένης επίδρασης της ξήρανσης του εδάφους και απώλεια νερού λόγω διαπνοής, προκαλώντας στο ξύλωμα σπηλαιώση και απώλεια αγωγιμότητας (Sperry et al., 1988). Το παρατεταμένο κλείσιμο των στομάτων μπορεί να ελαχιστοποιήσει την απώλεια νερού, ώστε να αποφευχθεί η υδραυλική κατάρρευση, αλλά μπορεί και να προωθήσει την διαδικασία έλλειψης του άνθρακα, όταν η χρήση του άνθρακα για αναπνοή υπερβαίνει την αφομοίωσή του. Έτσι, τα διαθέσιμα αποθέματα άνθρακα μπορεί να εξαντλούνται (Smith and Stitt, 2007), (Sala et al., 2010), (McDowell, 2011).

Υπάρχουν εργασίες που υποστηρίζουν ότι η έλλειψη σε άνθρακα είναι η κύρια αιτία που οδηγεί τα δέντρα σε θνησιμότητα σε περίοδο ξηρασίας όπως των Martinez-Vilalta et al., (2002), των Galiano et al., (2011,2012) και των Poyatos et al., (2013). Επίσης, έχει υποστηριχθεί μια αλληλεπίδραση μεταξύ της έλλειψης άνθρακα και της υδραυλικής κατάρρευσης σε διάφορα δασικά είδη (Galvez et al., 2011), (Anderegg and Callaway, 2012), (Adams et al., 2013), (Mitchell et al., 2013), (Quirk et al., 2013), (Sevanto et al., 2013).

Στη παρούσα διατριβή, έγινε προσπάθεια να εξεταστεί κατά πόσο η θνησιμότητα των δασών σε συνθήκες ξηρασίας θα μπορούσε να οφείλεται σε ανεπαρκείς ποσότητες ενεργειακών αποθεμάτων NSC (δηλαδή σακχάρων και αμύλου) εντός των φυτικών ιστών. Επιλέχθηκαν φυτικοί ιστοί από δέντρα χαλεπίου πεύκης, ένα είδος το οποίο αν και ανθεκτικό στην έλλειψη νερού έχει εντοπιστεί να απονεκρώνεται σε συνθήκες έντονης ξηρασίας (Alpert et al., 2006), (Burke et al., 2006), (Christensen et al., 2007), (Zhang et al., 2007). Οι περιοχές μελέτης επιλέχθηκαν έτσι ώστε να παρουσιάζουν μια διαβάθμιση εδαφικής υγρασίας από ξηρότερες προς υγρότερες συνθήκες και με τον τρόπο αυτόν να προσομοιάζουν το εύρος των συνθηκών που αντιμετωπίζει το είδος, συμπεριλαμβανομένων και αυτών των πολύ υγρών και των πολύ ξηρών. Η επέκταση, δε, των μετρήσεων σε διαφορετικές εποχές του χρόνου, ώστε να περιλαμβάνεται και η πιο ξηρή περίοδος του έτους συνέβαλαν στην πιο ολοκληρωμένη εξέταση των μεταβολών των επιπέδων των NSC.

Σύμφωνα, με τις μέσες συνθήκες των δύο βιοτόπων (υγρού και ξηρού) ανά περιοχή μελέτης, η Ελευσίνα, χαρακτηρίζεται ως η πιο ξηρή περιοχή, με μέσο δυναμικό νερού πριν την αυγή για το τέλος της ξηρής περιόδου να φτάνει τα -2MPa το 2014 (Διάγραμμα 4), ακολουθούν η Πάτρα (-1,6MPa) και η Font-Blanche (-1,3MPa), η Κυλλήνη (-1,2MPa) και το Saint-Mitre (-1,1MPa) που χαρακτηρίζεται ως η περιοχή με τις περισσότερες υγρές κλιματικές και εδαφικές συνθήκες.

Αν ισχύει η υπόθεση, ότι η θνησιμότητας των δασών σε συνθήκες ξηρασίας μπορεί να συνδέεται με έλλειψη ενεργειακών αποθεμάτων λόγω περιορισμών στη φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών θα έπρεπε να δούμε μειωμένες συγκεντρώσεις ενεργειακών αποθεμάτων NSC στις πιο ξηρές περιοχές και αυξημένες συγκεντρώσεις ενεργειακών αποθεμάτων στις πιο υγρές. Το φαινόμενο αυτό, δε, θα πρέπει να χαρακτηρίζει όλους τους φυτικούς ιστούς. Δηλαδή τόσο αυτούς που σχετίζονται άμεσα με τη φωτοσύνθεση όσο και αυτούς που αποταμιεύουν αυτά τα προϊόντα.

Οι βελόνες και το φλοιώμα παίζουν το ρόλο της φωτοσύνθεσης και της μεταφοράς των προϊόντων αυτής αντίστοιχα (Ivanov et al., 2006b), ενώ το ξύλωμα (κλαδιά, κορμός, ρίζες) εκτός από την μεταφορά νερού μέσω των τραχειϊδων έχει και ρόλο αποταμίευσης των προϊόντων της φωτοσύνθεσης, λόγω του παρεγχυματικού ιστού που διαθέτει (Τσέκος, 2004). Οι NSC που αποθηκεύονται στον παρεγχυματικό ιστό του ξυλώματος είναι διαθέσιμοι για την παροχή ενέργειας για τις ανάγκες αύξησης (κατά μήκος-πρωτογενής, και κατά πάχος-δευτερογενής) της χαλεπίου πέφυκης όταν αυτή συντελείται (Κιουρτσής, 2011), (Puri et al., 2015).

2. Σύνθεση και ερμηνεία των κύριων αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα τις διατριβής προκύπτει πως υπάρχουν αυξομειώσεις στις συγκεντρώσεις NSC ανάλογα με την κάθε περιοχή και τα επίπεδα ξηρότητας της αλλά και διαφοροποίηση μεταξύ των ιστών εντός και μεταξύ των δύο εποχών που συγκρίθηκαν.

Ειδικότερα, οι συγκεντρώσεις NSC στο ξύλωμα κορμού και κλαδιών εμφανίζουν τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις τους ξηρούς βιοτόπους. Βρέθηκε, δε, στατιστικώς σημαντική συσχέτιση μεταξύ αυξημένης ξηρότητας βιοτόπων (δυναμικού νερού πριν την αυγή) και αυξημένων συγκεντρώσεων NSC κορμού και κλαδιών (Διαγράμματα 4.16 και 4.20-καλοκαίρι). Επίσης, συγκριτικά με την άνοιξη το καλοκαίρι παρατηρείται μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των υψηλών συγκεντρώσεων NSC στο ξύλωμα κορμού και κλαδιών στους ξηρούς βιοτόπους σε σχέση με τις αντίστοιχες χαμηλές στους υγρούς βιοτόπους (Διαγράμματα 4.1 και 4.5). Τα παραπάνω ευρήματα υποδεικνύουν πως δεν μπορεί να υποστηριχθεί η άποψη ότι υπάρχει έλλειψη σε σάκχαρα και άμυλο στους αποταμιευτικούς ιστούς, καθώς η ξηρασία μεγαλώνει. Άρα τα παραπάνω ευρήματα δεν είναι υπέρ της υπόθεσης της «λιμοκτονίας» της χαλεπίου πέφυκης λόγω έλλειψης ενέργειας σε συνθήκες έντονης ξηρασίας.

Φαίνεται, δε, ότι το καλοκαίρι οι αυξημένες συγκεντρώσεις σακχάρων είναι αυτές που καθορίζουν αυτή την τάση (Διάγραμμα 4.21 για ξύλωμα κορμού, Διάγραμμα 4.25 για ξύλωμα κλαδιών και Διάγραμμα 4.22 για ξύλωμα από τις ρίζες). Ειδικότερα, οι αυξημένες συγκεντρώσεις NSC ξυλώματος κορμού την άνοιξη στους ξηρότερους βιοτόπους (Διάγραμμα 4.1) οφείλονται στις αυξημένες τιμές άμυλου (Διάγραμμα 4.11), ενώ το καλοκαίρι οφείλονται κυρίως στις αυξημένες τιμές σακχάρων (Διάγραμμα 4.6). Αντίστοιχη είναι και η εικόνα για τις συγκεντρώσεις NSC στο ξύλωμα κλαδιών. Στο ξύλωμα κλαδιών το καλοκαίρι παρατηρείται στους ξηρούς βιοτόπους μεγάλη μείωση της συγκέντρωσης σε άμυλο (Διάγραμμα 4.15) σε σχέση με τους υγρούς, αλλά μεγάλη αύξηση σε σάκχαρα (Διάγραμμα 4.10) που οδηγεί σε αύξηση συνολικά των NSC (Διάγραμμα 4.5).

Από την άλλη πλευρά, σε σχέση με την άνοιξη το καλοκαίρι παρουσιάζεται συνολικά μείωση στις συγκεντρώσεις NSC για ρίζες, βελόνες, φλοιώμα σε ξηρούς και υγρούς βιοτόπους, αλλά σχετικά λιγότερη στους υγρούς βιοτόπους για βελόνες και φλοιώμα με αποτέλεσμα να είναι σε υψηλότερα επίπεδα απ' ό,τι στους ξηρούς. Ειδικότερα, για τις συγκεντρώσεις NSC στις βελόνες (Διάγραμμα 4.3) εμφανίζονται υψηλότερες συγκεντρώσεις NSC στους υγρούς βιοτόπους σε σχέση με τους ξηρούς το καλοκαίρι. Οι μειωμένες τιμές στους ξηρούς βιοτόπους σε σχέση με τους υγρούς οφείλονται σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε σάκχαρα (Διάγραμμα 4.8) και ακόμη χαμηλότερες συγκεντρώσεις σε άμυλο (Διάγραμμα 4.13). Επίσης, για τις συγκεντρώσεις NSC στο φλοιώμα των κλαδιών (Διάγραμμα 4.4) παρατηρείται αντίστροφη εικόνα μεταξύ άνοιξης και καλοκαιριού. Στους ξηρούς βιοτόπους εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές την άνοιξη και οι χαμηλότερες το καλοκαίρι λόγω των τιμών του αμύλου (Διάγραμμα 4.14) όπως παρατηρήθηκε και στις βελόνες. Τα σάκχαρα δεν εμφανίζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ ξηρών και υγρών βιοτόπων και στις δύο εποχές (Διάγραμμα 4.9).

Συνεπώς, το καλοκαίρι στους ιστούς που έχουν άμεση σχέση με φωτοσύνθεση (βελόνες και φλοιώμα) οι συγκεντρώσεις σε NSC είναι χαμηλότερες στους ξηρότερους βιοτόπους. Διαφαίνεται, δηλαδή, πως στο τέλος του καλοκαιριού στους ξηρούς βιοτόπους υπάρχει σχετική μείωση σε φωτοσυνθετική δραστηριότητα λόγω έλλειψης νερού (Dickman et al. 2014), καθώς εμφανίζεται μείωση στις συγκεντρώσεις αμύλου σε βελόνες (όπου παράγεται λόγω φωτοσύνθεσης) και στο φλοιώμα (απ' όπου μεταφέρεται). Αν το παραπάνω ισχύει θα αναμέναμε το αντίστροφο να συμβαίνει στους υγρούς βιοτόπους γεγονός που όντως εντοπίστηκε.

Πάραυτα, η πιθανή μείωση στους ρυθμούς της φωτοσύνθεσης το καλοκαίρι δεν μεταφράζεται σε μειωμένες συγκεντρώσεις NSC στους αποταμιευτικούς ιστούς (κορμό και κλαδιά). Η πιθανότερη εξήγηση είναι ότι κατά την υγρή περίοδο που προηγήθηκε οι ρυθμοί της φωτοσύνθεσης (προσφοράς NSC) θα πρέπει να ήταν υψηλότεροι από τους ρυθμούς αύξησης (ζήτησης NSC) των δένδρων. Κατά συνέπεια στους αποταμιευτικούς ιστούς (κορμό και κλαδιά) των ξηρότερων βιοτόπων διατηρείται ακόμη περίσσειμα NSC στο τέλος του καλοκαιριού μιας και ο ρυθμός των κυτταρικών διαιρέσεων στους βλαστούς (αύξηση) έχει σχεδόν σταματήσει λόγω έλλειψης του αναγκαίου νερού για την υποστήριξη της πίεσης σπαραγής των κυττάρων. Τα υψηλά επίπεδα NSC των βλαστών κατά τη διάρκεια της ξηρασίας είναι αναμενόμενα και από άλλες μελέτες (Körner, 2003), (Maseyk et al., 2008b), (Klein et al. 2014) που υποστηρίζουν ότι οι υψηλοί ρυθμοί φωτοσύνθεσης κατά την υγρή περίοδο που προηγείται, ξεπερνούν την ζήτηση άνθρακα για δομική αύξηση.

Στους υγρότερους σε σχέση με τους ξηρότερους βιοτόπους είναι πολύ πιθανό η αύξηση (π.χ. η δευτερογενής κατά πάχος) να συνεχίζεται μέσα στο καλοκαίρι με αποτέλεσμα οι NSC στους βλαστούς να καταναλώνονται πιο γρήγορα (Karavatas et al., 1999) και ως εκ τούτου να εμφανίζουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις παρά τον υψηλότερο ρυθμό φωτοσύνθεσης σε σχέση πάντα με τους ξηρούς βιοτόπους. Το καλοκαίρι του 2014 ήταν όντως πολύ πιο υγρό στους βιοτόπους της νότιας Γαλλίας όπου και εμφανίζονται αυξημένες συγκεντρώσεις NSC και τα πεύκα είναι γνωστό πως μπορούν να διατηρήσουν υψηλούς ρυθμούς αύξησης υπό αυτές τις συνθήκες (De Luis et al., 2013). Η βροχόπτωση του υδρολογικού έτους (Σεπτέμβριος-Αύγουστος) όπως μετρήθηκε από τους κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς για το έτος 2014 είναι η εξής: Για την περιοχή της νότιας Γαλλίας, 567,4 mm (Μασσαλία), ενώ στην Ελλάδα ήταν 976,9 mm για την Κυλλήνη, 782,7mm για την περιοχή της Πάτρας και 476,2 και για την Ελευσίνα. Όμως εντός του καλοκαιριού και πριν τη δειγματοληψία ιστών (Ιούνιος-Αύγουστος) οι τιμές αυτές ήταν 92 mm νότια Γαλλία, 3 mm Κυλλήνη, 23 mm Πάτρα και 22mm Ελευσίνα..

Οι NSC το καλοκαίρι φαίνεται να βρίσκονται στους ξηρούς βιοτόπους κυρίως στη μορφή των σακχάρων (Διαγράμματα 4.7 και 4.12) για λόγους ωσμωρρύθμισης, δηλαδή για να μπορούν να

«τραβούν» ευκολότερα νερό από το ξηρό έδαφος ή για να το συγκρατούν ευκολότερα διατηρώντας υψηλή συγκέντρωση διαλυμένων ουσιών εντός των ιστών τους (Καραμπουρνιώτης, 2003). Σε ξηρούς βιοτόπους χαλεπίου πεύκης παρόμοιους με αυτούς της Ελευσίνας από την περιοχή του Ισραήλ, επίσης παρατηρήθηκε ότι την ξηρή περίοδο το άμυλο στους βλαστούς μειώθηκε ενώ τα διαλυμένα σάκχαρα αυξήθηκαν (Atzmon et al., 2002), (Klein et al., 2014). Οι παραπάνω ερευνητές καταλήγουν σε παρόμοιες παρατηρήσεις κατά την διάρκεια ξηρασίας. Βρήκαν δηλαδή ότι: (i) οι συγκεντρώσεις NSC το καλοκαίρι μειώνονται σε σχέση με την άνοιξη (ii) τα διαλυμένα σάκχαρα αυξάνονται και (iii) το άμυλο μειώνεται σταδιακά. Ακόμη διαπίστωσαν, ότι και στις ρίζες το καλοκαίρι παρατηρήθηκε αύξηση στα σάκχαρα και παράλληλη μείωση στο άμυλο με αυτή την υδρόλυση να θεωρείται ότι σχετίζεται με ωσμωρρύθμιση ή εξαγωγές προς άλλα τμήματα του δένδρου (Klein et al., 2014). Οι μεταβολές στις συγκεντρώσεις αμύλου και διαλυμένων σακχάρων είναι εποχιακές. Στα κλαδιά, όταν το άμυλο μειώνεται χωρίς να υπάρχει αύξηση στα σάκχαρα, υποδηλώνει ότι χρησιμοποιείται για τον μεταβολισμό, για την ωρίμανση του ξυλώματος και για την αύξηση στις βελόνες (Klein et al., 2014). Ωστόσο, οι βελόνες γενικά είναι αυτότροφες (Sprugel et al. 1991), και ως επί το πλείστον βασίζονται στα δικά τους προϊόντα φωτοσύνθεσης (Klein et al. 2005).

Οι ρίζες από την άλλη φαίνεται πως ίσως στους ξηρούς βιοτόπους να μπορούν να διατηρούν την ικανότητα αύξησης ακόμη και εντός της ξηρής περιόδου (Καραμπουρνιώτης, 2003, Klein et al., 2011) καταναλώνοντας NSC, για αυτό πιθανά και τα επίπεδα NSC στις ρίζες των ξηρών βιοτόπων είναι παρόμοια με αυτά των υγρών (Διάγραμμα 4.2). Οι Klein et al., (2014) παρατήρησαν ότι οι NSC στις ρίζες από δένδρα βιοτόπων ενδιάμεσης ξηρότητας μειώθηκαν κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου σε σχέση με την άνοιξη. Το γεγονός το αποδίδουν στο συνδυασμό από τη μια της μειωμένης φωτοσυνθετικής δραστηριότητας της περιόδου και άρα μειωμένης προσφοράς σε NSC και από την άλλη στην αυξημένη ζήτηση λόγω τη διαδικασία της αναπνοής ή στην αύξηση των ριζών ή στην τροφοδότηση της μυκόρριζας.

Περιορισμοί της μελέτης

- Το έτος 2014 ήταν ένα όχι τόσο ξηρό για την περιοχή της Ελλάδας όπου και βρίσκονταν οι ξηρότεροι βιότοποι της έρευνας (ετήσια βροχόπτωση περίπου κατά 20-30% πάνω από τις μέσες τιμές 30ετίας για τις περιοχές μελέτης). Οπότε σε ένα πιο ξηρό έτος θα περιμέναμε ακόμη μεγαλύτερη αύξηση σε NSC στο τέλος του καλοκαιριού.
- Το φαινολογικό στάδιο των δένδρων την άνοιξη καθορίζει τη ζήτηση σε άνθρακα. Παρόλη την διόρθωση που έγινε το φαινολογικό στάδιο ήταν παρόμοιο αλλά όχι και ταυτόσημο άρα και η ζήτηση των δένδρων σε NSC δεν ήταν ακριβώς η ίδια.
- Η μέτρηση των επιπέδων της δευτερογενούς κατά πάχος αύξησης των δένδρων και του χρόνου που αυτή συντελέστηκε θα έδινε πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα για τις ανάγκες ζήτησης των δένδρων σε άνθρακα.
- Η μέτρηση των NSC δίνει ένα τμήμα της εικόνας σχετικής με τα ενεργειακά αποθέματα των κωνοφόρων. Μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα θα απαιτούσε και τη μέτρηση των συγκεντρώσεων λιπιδίων εντός των ιστών αν και αναμένεται να εμφανίζουν παρόμοιες τάσεις (Hoch et al., 2002).

Συμπεράσματα

Η ξηρασία που σχετίζεται με την θνησιμότητα των δασών αυξάνεται σε παγκόσμιο επίπεδο (van Mantgem et al., 2009; Allen et al., 2010; Peng et al., 2011) και έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει αρνητικά τα αποθέματα του άνθρακα των χερσαίων οικοσυστημάτων (Kurz et al., 2008), (Hicke et al., 2012) αλλά και το ίδιο το οικοσύστημα. Παρά τις πολλές έρευνες, οι μηχανισμοί που σχετίζονται με την θνησιμότητα των δασών και την ξηρασία δεν έχουν διαλευκανθεί (McDowell and Sevanto, 2010), (Sala et al., 2010, 2012), περιορίζοντας την ικανότητα των μοντέλων δυναμικής βλάστησης να συλλάβουν με ακρίβεια και να προβλέψουν τα γεγονότα της θνησιμότητας (Peng, 2000), (Fisher et al., 2010), (McDowell et al., 2013), (Powell et al., 2013), (Xu et al., 2013).

Η παρούσα διατριβή αλλά και αντίστοιχες μελέτες που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, αφήνουν ως το πιο πιθανό ενδεχόμενο η θνησιμότητα των δασών σε συνθήκες ξηρασίας να οφείλεται σε υδραυλική κατάρρευση αφού οι συγκεντρώσεις μη δομικών υδατανθράκων στους βλαστούς της χαλέπιου πεύκης (αλλά και σε άλλα παρόμοιου τύπου φυτά) βρέθηκαν υψηλότερες στις ξηρότερες περιοχές. Άρα η υπόθεση της σταδιακής «λιμοκτονίας» λόγω έλλειψης ενεργειακών αποθεμάτων δεν είναι η επικρατέστερη, όταν πριν την ξηρή περίοδο υπάρχει επάρκεια υγρασίας για την υποστήριξη υψηλών ρυθμών φωτοσύνθεσης (προσφοράς NSC) αλλά οι ρυθμοί αύξησης (ζήτησης NSC) βρίσκονται σε χαμηλότερα επίπεδα.

Ανεξάρτητα από τον λόγο που οδηγεί στην διακοπή της αύξησης ενός φυτού, η αύξηση δεν φαίνεται να περιορίζεται από την προσφορά NSC. Μια σοβαρή ξηρασία, βέβαια, φαίνεται να περιορίζει την αύξηση όσο και τη φωτοσύνθεση. Φαίνεται, όμως, ότι τα δάση τροφοδοτούνται με ενώσεις άνθρακα χωρίς σημαντικές ελλείψεις σε περιόδους υψηλής ζήτησης άνθρακα (Körner, 2003). Δεν αποκλείεται, όμως, το ενδεχόμενο κατά την διάρκεια μιας παρατεταμένης και πολύ σοβαρή ξηρασία, τα δέντρα να εισέλθουν σε μία φάση μείωσης των αποθεμάτων τους, είτε συστηματικά είτε σε συγκεκριμένα όργανα (McDowell et al., 2008, 2011), (Mitchell et al., 2013).

Εισηγήσεις

Με βάση τα αποτελέσματα της διατριβής και των σχετικών ευρημάτων στη βιβλιογραφία δεν μπορούμε να αναμένουμε ότι στα Μεσογειακά Οικοσυστήματα η αύξηση του CO₂ της ατμόσφαιρας θα επιταχύνει τους ρυθμούς αύξησης της ξυλώδους βλάστησης μιας και τόσο θαμνώδη όσο και δενδρώδη είδη δεν φαίνεται να εμφανίζουν ενεργειακό έλλειμμα.

Θα πρέπει, συνεπώς, η γνώση αυτή να ενσωματωθεί στα νέα βιοκλιματικά μοντέλα πρόβλεψης της ανταπόκρισης των Μεσογειακών Δασών αλλά και στα μοντέλα του κύκλου του άνθρακα για την πρόβλεψη της αλληλεπίδρασής δασών με την ατμόσφαιρα, σε συνθήκες συνεχιζόμενης αύξησης των «αερίων του θερμοκηπίου» στην ατμόσφαιρα της Γης.

Επίσης, θα είχε ενδιαφέρον η εξέταση και άλλων δασικών ειδών σε μεγαλύτερα υψόμετρα και με διαφορετική διάρκεια αυξητικής περιόδου στα οποία έχει εμφανιστεί δασική θνησιμότητα στη Μεσόγειο (π.χ. ελάτη, κέδρος, μαύρη πεύκη) και για τα οποία θεωρείται ότι εμφανίζουν έλλειμμα άνθρακα, προκειμένου να εξεταστεί αν τα επίπεδα των NSC τους ανταποκρίνονται με τον ίδιο τρόπο όπως η χαλέπιος πεύκη.

Βιβλιογραφία

- Ackerly, D. D., (2004). Functional strategies of chaparral shrubs in relation to seasonal water deficit. *Ecological Monographs*, 74, 25–44.
- Adams, H. D., Germino, M. J., Breshears, D. D., Barron-Gafford, G. A., Guardiola-Claramonte, M., Zou, C. B., Huxman, T. E., (2013). Nonstructural leaf carbohydrate dynamics of *Pinus edulis* during drought-induced tree mortality reveal role for carbon metabolism in mortality mechanism. *New Phytologist*, 197, 1142–1151.
- Alder, N. N., Sperry, J. S., Pockman, W. T., (1996). Root and stem xylem embolism, stomatal conductance, and leaf turgor in *Acer grandidentatum* populations along a soil moisture gradient. *Oecologia*, 105, 293–301.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 660–684.
- Alpert, P., Baldi, M., Ilani, R., (2006). Relations between climate variability in the Mediterranean region and the tropics: ENSO, South Asian and African monsoons, hurricanes and Saharan dust. *Dev Earth Environ Sci*, 4, 149–177.
- Anderegg, W. R.L., Callaway, E. S., (2012). Infestation and hydraulic consequences of induced carbon starvation. *Plant Physiology*, 159, 1866–1874.
- Atzmon, N., Schiller, G., Riov, Y., (2002). Survey of seasonal carbohydrate level fluctuations as a basis to understand development and growth of forest trees in Israel.
- Bartlett, M., Scoffoni, C., Sack, L., (2012). The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: a global meta-analysis. *Ecology Letters*, 15, 393–405.
- Bernstein, L., Bosch, P., Canziari, O., (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, NY.
- Bigler, C., Braker, O. U., Bugmann, H., Dobbertin, M., Rigling, A., (2006). Drought as an inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems*, 9, 330–343.
- Bossel, H., (1986). Dynamics of forest dieback: systems analysis and simulation. *Ecological Modeling*, 34, 259–288.
- Bryant, J. P., (2012). North Main Divide Road and Ortega Highway, Cleveland National Forest, Orange Co., CA, 2-17-12.
- Boyer, J. S., (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218, 443–448.
- Bucci, S. J., Goldstein, G., Meinzer, F. C., Scholz, F. G., Franco, A. C., Bustamante, M., (2004). Functional convergence in hydraulic architecture and water relations of tropical savanna trees: from leaf to whole plant. *Tree Physiology*, 24, 891–899.
- Burke, E. J., Brown, S. J., Christidis, N., (2006). Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley centre climate model. *J Hydrometeorol*, 7, 1113–1125.
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., Pereira, J. S., (2003). Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant. *Funct. Plant Biol.*, 30, 239–264.

- Chone, X. I., Van Leeuwen, C., Dubourdieu, D., Pierre, J. G., (2001). Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status, *Annals of Botany*, 87, 477–483.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuic, A., (2007). Regional climate projections. Climate change 2007: the physical science basis. Contributions of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, UK/New York, NY, 847–940.
- De Luis, M., Čufar, K., Di Filippo, A., Novak, K., Papadopoulos, A., Piovesan, G., Rathgeber, C., B., K., ,Raventós, J., Saz, M., A., Smith, T., K., (2013). Plasticity in Dendroclimatic Response across the Distribution Range of Aleppo Pine (*Pinus halepensis*), *PLoS ONE*, 8 (12).
- Demchik, M. C., Sharpe, W. E., (2000). The effect of soil nutrition, soil acidity and drought on northern red oak (*Quercus rubra* L.) growth and nutrition on Pennsylvania sites with high and low red oak mortality. *Forest Ecology and Management*, 136, 199–207.
- Dickman, T. L., McDowell, G. N., Sevanto, S., Pangle, R. E., Pockman, T. W., (2014). Carbohydrate dynamics and mortality in a piñon-juniper woodland under three future precipitation scenarios, *Plant, Cell and Environment*, 38(4), 729–39.
- Dracup, J. K., Lee, E., Paulson, Jr., (1980). On the definition of droughts. *Water Resource*, 16 (2), 297–302.
- Eid, T., Tuhus, E., (2001). Models for individual tree mortality in Norway. *For. Ecol. Manage*, 154, 69–84.
- Fahn, A., (1990). *Plant anatomy*, Pergamon Press, Oxford.
- Fisher, R., McDowell, N., Purves, D., Moorcroft, P., Sitch, S., Cox, P., Woodward, F. I., (2010). Assessing uncertainties in a second-generation dynamic vegetation model caused by ecological scale limitations. *New Phytologist*, 187, 666–681.
- Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., Sharkey, T. D., (2004). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biol.* 6, 269–279.
- Fridman, J., Stahl, G., (2001). A three-step approach for modeling tree mortality in Swedish forests. *Scand. J. For. Res.*, 16, 455–466.
- Galvez, D. A., Landhäusser, S. M., Tyree, M. T., (2011). Root carbon reserve dynamics in aspen seedlings: does simulated drought induce reserve limitation? *Tree Physiol*, 31, 250–257.
- Guarin, A., Taylor, A. H., (2005). Drought triggered tree mortality in mixed conifer forests in Yosemite National Park, California, USA. *Forest Ecology and Management*, 218, 229–244.
- Hawkes, C., (2000). Woody plant mortality algorithms: description, problems, and progress. *Ecol. Model*, 10, 225–232.
- Heim, R. R., (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States *Bull. Am. Meteorology Soc*, 83 (8), 1149–1166.
- Hicke, J. A., Allen, C. D., Desai, A. R., Dietze, M. C., Hall, R. J., Hogg, E. H., Vogelmann, J., (2012). Effects of biotic disturbances on forest carbon cycling in the United States and Canada. *Global Change Biology*, 18, 7–34.
- Hoch, G., Popp, M., Körner, C., (2002). Altitudinal increase of mobile carbon pools in *Pinus cembra* suggest sink limitation at the Swiss treeline. *Oikos*, 98, 361–374.

- Hoch, G., Richter, A., Körner, C., (2003). Non-structural carbohydrates in temperate forest trees. *Plant Cell and Environment*, 26, 1067-1081.
- Iglesias, A., Cancelliere, D., Gabina, A., Lopez-Francow, M., Moneo, G., Rossi, (2007). Οδηγίες Διαχείρισης της Ξηρασίας. Ευρωπαϊκή Ζώνη- Γραφείο Συνεργασίας Ευρωπαϊκής Βοήθειας, Ευρω-μεσογειακό Περιφερειακό Πρόγραμμα για Τοπική Διαχείριση Υδάτων (MEDAwater) Μεσογειακή Ετοιμότητα και Σχεδιασμός Περιορισμού Ξηρασίας (MEDROPLAN).
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ivanov, A. G., Krol, M., Sveshnikov, D., Malmberg, G., Gardeström, P., Hurry, V., (2006b). Characterization of the photosynthetic apparatus in cortical bark chlorenchyma of Scots pine. *Planta*, 223(6), 1165-77.
- Jones, G. V., Michael, A. W., Storchmann, K., (2005). Climate change and global wine quality. *Climate Change*, 73, 319-343.
- Karavatas, S., Manetas, Y., (1999). Seasonal patterns of photosystem 2 photochemical efficiency in evergreen sclerophylls and drought semi-deciduous shrubs under Mediterranean field conditions. *Photosynthetica*, 36, 41-49.
- Klein, A., (2002). Daily dataset of 20th century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 22, 1441-1453.
- Klein, T., Hemming, D., Lin, T., Grünzweig, J. M., Maseyk, K. S., Rotenberg, E., Yakir, D., (2005). Association between tree-ring and needle delta C-13 and leaf gas exchange in *Pinus halepensis* under semi-arid conditions. *Oecologia*, 144, 45-54.
- Klein, T., Cohen, S., Yakir, D., (2011). Hydraulic adaptations underlying drought resistance of *Pinus halepensis*. *Tree Physiol*, 31, 637-648.
- Klein, T., Rotenberg, E., Cohen-Hilaleh, E., Raz-Yaseef, N., Tatarinov, F., Ogée, J., Cohen, S., Yakir, D., (2014). Quantifying transpirable soil water and its relations to tree water use dynamics in a water-limited pine forest. *Ecohydrology*, 7, 409-419.
- Kolb, T. E., McCormick, L. H., (1993). Etiology of sugar maple decline in four Pennsylvania stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 23, 2395-2402.
- Körner, C., (2003). Carbon limitation in trees. Institute of Botany, University of Basel, Schönbeinstrasse 6, CH-4056 Basel, Switzerland, 91, 4-17.
- Körner, C., (2013). Growth Controls Photosynthesis-Mostly. *Nova Acta Leopoldina*, 391, 273-283.
- Kurz, W. A., Dymond, C. C., Stinson, G., Rampley, G. J., Neilson, E. T., Carroll, A. L., Safranyik, L., (2008). Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, 452, 987-990.
- Larsson, S., Oren, R., Waring, R.H., Barrett, J.W., (1983). Attacks of mountain pine beetle as related to tree vigor of ponderosa pine. *Forest Science*, 29, 395-402.
- Leatherberry, E., Spencer J., Schmidt, T., Carroll, M., (1990). An Analysis of Minnesota's Fifth Forest Resources Inventory. Resource Bull. NC-165, USDA, Forest Service, North Central Research Station, St. Paul, MN.

- Lenz, T. I., Wright, I. J., Westoby, M., (2006). Interrelations among pressure-volume curve traits across species and water availability gradients. *Physiologia Plantarum*, 127, 423–433.
- Lev-Yadun, S., (2000). Wood structure and the ecology of annual growth ring formation in *Pinus halepensis* and *P. brutia*. In: *Ecology, Biogeography and Management of Pinus halepensis and P. brutia Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*. (eds Ne'eman G, Trabaud L), 67-78.
- Lionello, P., Galati, M. B., (2008). Links of the significant wave height distribution in the Mediterranean sea with the Northern Hemisphere teleconnection patterns. *Advances in Geoscience*, 17, 13–18.
- Lloret, F., Siscart, D., Dalmases, C., (2004). Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain). *Global Change Biology*, 10, 2092–2099.
- Longland, C. A., Byrd, M. B., (2006). *Pasture Nonstructural Carbohydrates and Equine Laminitis*, American Society for Nutrition.
- Manion, P. D., (1991). *Tree disease concepts*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.
- Maseyk, K., Lin, T., Rotenberg, E., Grünzweig, J. M., Schwartz, A., Yakir, D., (2008b) Physiology–phenology interactions in a productive semiarid pine forest. *New Phytol*, 178, 603–616.
- Martinez-Vilalta, J., Pinol, J., Beven, K., (2002). A hydraulic model to predict drought-induced mortality in woody plants: an application to climate change in the Mediterranean. *Ecological Modelling*, 155, 127–147.
- McDowell, N. G., Fisher, R. A., Xu, C., Domec, J. C., Hölttä, T., Mackay, D., S., Pockman, W., T., (2013). Evaluating theories of drought-induced vegetation mortality using a multimodel–experiment framework. *New Phytologist*, 200, 304–321.
- McDowell, N. G., (2011). Mechanisms linking drought, hydraulics, carbon metabolism, and vegetation mortality. *Plant Physiology*, 155, 1051–1059.
- McDowell, N. G., Sevanto, S., (2010). The mechanisms of carbon starvation: how, when, or does it even occur at all? *New Phytologist*, 186, 264–266.
- McDowell, N. G., Pockman, W. T., Allen, C. D., (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 178, 719-739.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, USA, 179-184.
- Merayo, G. J. L., Mestre, A., Peral, C., (1997). La sequia meteorologica del period 1991-95 en Espana. 3rd Conferencia Intemacional Gestion de las Sequias, IBERDROLA Instituto Tecnologico, 41-47.
- Miller, T. G. JR., (2004), Περιβαλλοντικές Επιστήμες, Εκδότης: ΠΑΠΙΚΟΥ Σ.&ΣΙΑ ΟΕ (ΕΚΔ.ΙΩΝ).
- Mirov, N.T., (1967). *The Genus Pinus*. Ronald Press Co., N.Y.
- Mishra, A.K., Desai, V.R., (2005). Drought forecasting using stochastic models. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 19, 326-339.

- Mitchell, P. J., O'Grady, A. P., Tissue, D. T., White, D. A., Ottenschlaeger, M. L., Pinkard, E. A., (2013). Drought response strategies define the relative contributions of hydraulic dysfunction and carbohydrate depletion during tree mortality. *New Phytol*, 197, 862–872.
- Monserud, R., Sterba, H., (1999). Modeling individual tree mortality for Austrian forest species. *For. Ecol. Manage*, 113, 109–123.
- Muelder, D. W., Hall, D. O., Skolmen, R. G., (1963). Root growth and first year survival of *Pinus ponderosa* in second stands of the Sierra Nevada. California University, School of Forestry, Berkley.
- Mueller-Dumbois, D., (1987). Natural dieback in forests. *Bioscience*, 37, 575–583.
- Mutch, L., Parsons, D., (1998). Mixed conifer forest mortality and establishment before and after prescribed fire in Sequoia National Park, CA. *For. Sci.*, 44, 341–355.
- Ne'eman, G., Trabaud, L., (2000). Ecology, Biogeography and Management of *Pinus halepensis* and *P. brutia* Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin. Backhuys, Leiden.
- Palmer, W. C., (1965). Meteorological Drought. US Department of Commerce, Weather Bureau, Research Paper, 45, 1-55.
- Pedersen, B. S., (1998). The role of stress in the mortality of midwestern oaks as indicated by growth prior to death. *Ecology*, 79, 79–93.
- Peng, C. H., (2000). From static biogeographical model to dynamic global vegetation model: a global perspective on modelling vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 135, 33–54.
- Peng C., Ma, Z., Lei, X., Zhu, Q., Chen, H., Wang, W., Zhou, X., (2011). A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests. *Nature Climate Change*, 1, 467–471.
- Popp, M., Lied, W., Meyer, A., Richter, A., Schiller, P., Schwitte, H., (1996). Sample preservation for determination of organic compounds: microwave versus freeze-drying. *J Exp Bot*, 47, 1469–1473.
- Powell, T. L., Galbraith, D. R., Christoffersen, B. O., Harper, A., Imbuzeiro, H. M. A., Rowland, L., Moorcroft, P R., (2013). Confronting model predictions of carbon fluxes with measurements of Amazon forests subjected to experimental drought. *New Phytologist*, 200, 350–365.
- Poyatos, R., Aguade, D., Galiano, L., Mencuccini, M., Martinez-Vilalta, J., (2013). Drought-induced defoliation and long periods of near-zero gas exchange play a key role in accentuating metabolic decline of Scots pine. *New Phytol*, 200, 388–401.
- Puri, E., Hoch, G., Körner, C., (2015). Defoliation reduces growth but not carbon reserves in Mediterranean *Pinus pinaster* trees, 29, 1187–1196.
- Quirk, J., McDowell, N. G., Leake, J. R., Hudson, P. J., Beerling, D. J., (2013). Increased susceptibility to drought-induced mortality in *Sequoia sempervirens* (Cupressaceae) trees under Cenozoic atmospheric carbon dioxide starvation. *American Journal of Botany*, 100, 582–591.
- Rambal, S., (1984). Water balance and pattern of root water uptake by a *Quercus coccifera* L. evergreen scrub. *Oecologia*, 62, 18-25.
- Rolland, C., Lemperiere, G., (2004). Effects of climate on radial growth of Norway spruce and interactions with attacks by the bark beetle *Dendroctonus micans* (Kug., Coleoptera:

- Scolytidae): a dendroecological study in the French Massif Central. *Forest Ecology and Management*, 201, 89–104.
- Rundel, P. W., Yoder, B. J., (1998). Ecophysiology of *Pinus*. In: *Ecology and biogeography of Pinus* (Richardson DM ed) , Cambridge University Press, Cambridge, 296–323.
 - Salleo, S., Lo Gullo, M. A., Raimondo, F., Nardini, A., (2001). Vulnerability to cavitation of leaf minor veins: any impacts on leaf gas exchange . *Plant, Cell and Environment*, 24, 851–859.
 - Sala, A., Piper F., Hoch, G., (2010). Physiological mechanisms of droughtinduced tree mortality are far from being resolved. *New Phytologist*, 186, 274–281.
 - Sala, A., Woodruff, D. R., Meinzer, F. C., (2012). Carbon dynamics in trees: feast or famine? *Tree Physiology*, <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tpr143>.
 - Sarris, D., Christodoulakis, D., Körner, C., (2007). Recent decline in precipitation and tree growth in the eastern Mediterranean. *Global Change Biology*, 13, 1187–1200.
 - Scholander, P. F., (1966). The role of solvent pressure in osmotic systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 55(6), 1407–1414.
 - Schweingruber, F. H., (1996). *Tree Rings and Environment. Dendroecology*. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Haupt, Berne.
 - Sevanto, S., McDowell, N. G., Dickman, L. T., Pangle, R., Pockman, W. T., (2013). How do trees die? A test of the hydraulic failure and carbon starvation hypotheses. *Plant, Cell & Environment*, 37, 153–161.
 - Shields, L. M., (1950). Leaf xeromorphy as related to physical and structural influences, *Botanic Review*, 16, 399–447.
 - Smith, A. M., Stitt, M., (2007). Coordination of carbon supply and plant growth. *Plant, Cell & Environment*, 30, 1126–1149.
 - Sperry, J. S., Donnelly, J. R., Tyree, M. T., (1988). A method for measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. *Plant, Cell and Environment*, 11, 35–40.
 - Stiller, V., (2009). Soil salinity and drought alter wood density and vulnerability xylem cavitation of baldcypress (*Taxodium distichum* (L.) Rich) seedlings. *Env. Exp. Bot.*, 67, 164–171.
 - Suarez, M. L., Ghermandi, L., Kitzberger, T., (2004). Factors predisposing episodic drought-induced tree mortality in *Nothofagus* – site, climatic sensitivity, and growth trends. *Journal of Ecology*, 92, 954–966.
 - Taiz, L., Zeiger, E., (1998). *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc, New York.
 - Talsma, T., Gardner, E. A., (1986). Soil water extraction by mixed Eucalyptus forest during a drought period. *Australian Journal of Soil Research*, 24, 25–32.
 - Thanos, C. A., (2000). Ecophysiology of seed germination in *Pinus halepensis* and *P. brutia*. In: *Ecology, Biogeography and Management of Pinus halepensis and P. brutia Forest Ecosystems in the Mediterranean Basin*, G. Ne’eman and L. Trabaud (eds.), Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 37–50.
 - Twomey, S., (1959). Quantitative aspects of seeding rates for use in supercooled clouds. *Puy-de-Dome Observatoire, Bulletin*, 2 (2), 33–42.
 - United Nations Framework Convention on Climate Change,(1992). United Nations 1 (3).

- van Mantgem, P. J., Stephenson, N. L., Byrne, J. C., Daniels, L. D., Franklin, J. F., Fule, P. Z., Veblen, T. T., (2009). Widespread increase of tree mortality rates in the Western United States. *Science*, 323, 521–524.
- Vogel, R. J., Armstrong, W. P., White, K. L., Cole, K. L., (1977). The closed cone pine and cypresses. In: M.C. Barbour and J. Major (eds). *Terrestrial vegetation of California*. Wiley, New York, 295-358.
- Wallin, KF., Kolb, TE., Skov, KR., Wagner, MR., (2003). Effects of crown scorch on ponderosa pine resistance to bark beetles in northern Arizona. *Environmental Entomology*, 32, 652–661.
- Waring, RH., Pitman, GB., (1985). Modifying lodgepole pine (*Pinus contorta*) stands to change susceptibility to mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae*) attack. *Ecology*, 66, 889–897.
- WMO., (2006). Drought monitoring and early warning: concepts, progress and future challenges. Weather and climate information for sustainable agricultural development. ISBN: 92-63-11006-9, World Meteorological Organization.
- Wullschlegel, SD., McLaughlin, SB., Ayres, MP., (2004). High-resolution analysis of stem increment and sap flow for loblolly pine trees attacked by southern pine beetle. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 2387–2393.
- Xu, C., McDowell, N. G., Sevanto, S., Fisher, R. A., (2013). Our limited ability to predict vegetation dynamics under water stress. *New Phytologist*, 200, 298– 300.
- Yevjevich, V., (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers*, Colorado State Univ., Fort Collins, Colorado, 23, 17-18.
- Zhang, X., Zwiers, F. W., Hegerl, G. C., Lambert, H. L., Gillett, N. P., Solomon, S., Stott, P. A., Nozawa, T., (2007). Detection of human influence on twentieth- century precipitation trends. *Nature*, 448, 461–465.

Στα Ελληνικά

- Γαλάτης, Β., Γανωτάκης, Δ., Γκανή – Σπυροπούλου, Κ., Καραμπουρνιώτης, Γ., Κοτζαμπάσης Κ., Κωνσταντινίδου, Ελ. – Ι., Μανέτας, Ι., Ρουμπελάκη – Αγγελάκη, Κ. Α., (2003). *Φυσιολογία Φυτών. Από το μόριο στο περιβάλλον*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Θάνος, Α. Κ., (2012). Τα καμένα δάση της Ευρωστίνης.
- Θυμάκης, Ν., Τσουτσουδάκη, Ε., (2011). «Φυτά του πάρκου Αντώνης Τρίτσης».
- Καραμπουρνιώτης, Γ., (2003). *Φυσιολογία Καταπονήσεων των Φυτών*, Αθήνα: Εκδόσεις Έμβρυο.
- Κιουρτσής, Κ. Μ., (2011). *Στοιχεία Δασικής Βοτανικής για Εκπαιδευτές Ενηλίκων σε δομές Δια Βίου Εκπαίδευσης και Κατάρτισης*.
- Κιτσάκης, Χ. Κ., (2008). *Φυσιολογίας Φυτών. Σημειώσεις Θεωρίας*. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωπονικής Βιοτεχνολογίας, Τομέας Βιολογίας Φυτών, Αθήνα.

- Μαμάσης, Ν., (1997). Ανάλυση βροχοπτώσεων κατά τύπο καιρού. Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μαμάσης, Ν., Κουτσογιάννης, Δ., (2007). Ξηρασία: φυσικές, κοινωνικές και τεχνολογικές πτυχές – το παράδειγμα της Αθήνας. Εθνικό και Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μιμίκου, Μ. Α., Φωτόπουλος, Φ. Σ., (2004). Σημειώσεις στο Μεταπτυχιακό Μάθημα υδατικό περιβάλλον και ανάπτυξη, Εθνικό και Μετσόβιο Πολυτεχνείο ΔΠΜΣ περιβάλλον και ανάπτυξη, Αθήνα.
- Μπαλούτσος, Γ., Μπουρλέτσικας, Α., Γκούμα, Β., (2006). Η ξηρασία: Ένα επικίνδυνο ακραίο κλιματικό φαινόμενο με ιδιαιτερότητες στη διαχείρισή του, 24, 10-13.
- Μπρέστα, Π., (2009). Επίδραση της υδατικής καταπόνησης σε μορφολογικές και φυσιολογικές παραμέτρους των φύλλων σε ανθεκτικές και μη ποικιλίες του σίτου, Αθήνα.
- Ντάφης, Σ., (1986). Δασική οικολογία. Δάσος και φωτιά, 214-218.
- Ραδόγλου, Κ., (2014). Επίδραση της κλιματικής αλλαγής στα Δασικά οικοσυστήματα. Προτεινόμενα διαχειριστικά μέτρα για την ενίσχυσης της προσαρμογής τους Ελληνικά Δάση και Κλιματική Αλλαγή 3 Απριλίου 2014, Διοργανωτές Φιλοδασική Ένωση Αθηνών, Ευώνυμος Οικολογική Βιβλιοθήκη, Υλή, Ξενοδοχείο Αμαλία Αθήνα.
- Σαράντης, Τ., (2013). Η ξηρασία σκοτώνει τη βλάστηση, Δασαρχείο.
- Στάμκος, Γ., (2015). Ποιο θα είναι το μελλοντικό κλίμα της Ελλάδας; Θα είναι η Ελλάδα Βιώσιμη ως το 2070μ.Χ.; , Ελλάδα και Κλιματικές Αλλαγές, Περιοδικό Ζενίθ.
- Τσακίρης, Γ., (2000). Η ξηρασία της Μεσογείου. Η διαδικασία της ερημοποίησης αναμένεται να ενισχυθεί αν επιβεβαιωθούν τα σενάρια των κλιματικών αλλαγών που προβλέπουν πολλές ερευνητικές ομάδες και διεθνείς οργανισμοί, Το Βήμα.
- Τσέκος, Ι. Β., (2004). Φυσιολογία φυτών – Το κύτταρο ως ενεργητικό σύστημα-φαινόμενα μεταφοράς-μεταβολισμός-αύξηση και ανάπτυξη-μοριακή φυσιολογία. Εκδοτικός οίκος Αδελφών Κυριακίδη.
- Υπ. Γεωργίας, Γ.Γ. Δασών & Φυσ. Περιβάλλοντος, (2000). Κριτήρια και δείκτες αειφορικής διαχείρισης των δασών της Ελλάδας. Αθήνα.
- Φλόκας, Α., (1997). Μαθηματικά Μετεωρολογίας Κλιματολογίας.

Διαδικτυακές Πηγές

- ECA&D: European Climate Assessment & Dataset: <https://reanalyses.org/observations/ecad-european-climate-assessment-dataset> (προσπελάστηκε στις 10 Αυγούστου 2015).
- Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) : http://www.hnms.gr/hnms/greek/index_html (προσπελάστηκε στις 2 Αυγούστου 2015).
- Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών: <http://www.noa.gr/index.php?lang=el> (προσπελάστηκε στις 2 Αυγούστου 2015).

- ΕΘΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.) : <http://www.nagref.gr/> (προσπελάστηκε στις 6 Ιουλίου 2015).
- Meteo France: <http://www.meteofrance.com/accueil> (προσπελάστηκε στις 12 Αυγούστου 2015).
- National Drought Mitigation Center (2008). Understanding Your Risk and Impacts: Impacts of Drought (<http://www.drought.unl.edu/risk/impacts.htm>).
- Oblack, R., (2015). What Causes Droughts?, Weather Expert (<http://weather.about.com/od/drought/f/droughts.htm>).
- The Hydrological Observatory of Athens: <http://hoa.ntua.gr/> (προσπελάστηκε στις 3 Αυγούστου 2015).
- Wikipedia:
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BB%CE%B5%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%BD%CE%B1> (προσπελάστηκε στις 10 Αυγούστου 2015).
- Υπουργείο Παραγωγικής Ανασυγκρότησης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας : <http://www.ypeka.gr/> (προσπελάστηκε στις 2 Αυγούστου 2015).