

ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ (Α.Τ.Ε.Ι.)
ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Μελέτη του φαινομένου της οσμоруθμισης σε φυτά
γλυκού σόργου ποικιλίας Keller [*Sorghum bicolor* (L.)
Moench, cv. Keller] που αναπτύσσονται σε δοχεία, σε δυο
επίπεδα άρδευσης, μετρώντας το δυναμικό του νερού στα
φύλλα και την μεταβολή του.**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΣΙΜΠΟΥΚΗΣ ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ : Α. ΚΑΜΠΡΑΝΗΣ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2006

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ	1
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ	10
4. ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	10
4.1 ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	11
4.1.1 Χαρακτηριστικά του εδάφους	11
4.1.2 Δομή του πορώδους	12
4.2 ΕΙΣΟΔΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	13
4.2.1 Υδατοικανότητα εδάφους	15
4.2.2 Σημείο μόνιμης μάρανσης	16
4.2.3 Άμεσα διαθέσιμο νερό.....	16
4.3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	17
4.4 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΝ ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	19
4.4.1 Δυνάμεις στις επαφές νερού και αέρα.....	19
4.4.2 Δυνάμεις στις επαφές του νερού και στερεού σώματος.....	20
4.4.3 Εδαφική αγωγιμότητα	21
4.5 ΚΙΝΗΣΗ ΥΔΡΑΤΜΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ	23
4.6 ΕΞΑΤΜΙΣΗ, ΑΝΟΔΙΚΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	23
4.7 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	25
4.7.1 Βαρομετρική περιεκτικότητα σε νερό.....	25
4.7.2 Έλεγχος νετρονίων	25
4.7.3 Τασίμετρα	29
4.7.4 Πορώδες πλακίδια ηλεκτρικής αντίστασης	30
4.7.5 Εδαφικά ψυχρόμετρα	31
4.7.6 Ρεφλεκτρομετρία χρονικής περιοχής (reflectometry, TDR).....	33
5. ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΡΙΖΑ	35
5.1 ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ ΣΤΟ ΡΙΖΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	35
6. ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΦΥΤΟ	38
6.1 ΜΟΡΦΕΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΛΥΤΩΝ ΟΥΣΙΩΝ ΣΤΟ ΦΥΤΟ	38
6.1.1 Μαζική ροή	38
6.1.2 Διάχυση	39
6.1.3 Ωσμωση.....	39
6.1.4 Ενεργή ή μη οσμωτική λήψη του νερού	40
6.1.5 Θερμοκρασία και κίνηση νερού.....	40
7. ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΑΓΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	42
8. ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΑ ΣΤΑ ΦΥΛΛΑ	44
8.1 ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΦΑΣΗ ΥΔΡΑΤΜΟΥ	45
9. ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΟ ΚΥΤΤΑΡΟ	50
9.1 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΦΥΤΙΚΟΥ ΚΥΤΤΑΡΟΥ	53

9.1.1 Κυτταρικό τοίχωμα	53
9.1.2 Κυτταρόπλασμα	56
9.1.3 Χυμοτόπια	57
9.1.4 Μεμβράνες των κυττάρων	58
9.2 ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΦΥΤΙΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ.....	60
9.2.1 Νερό στο κυτταρικό τοίχωμα	60
9.2.2 Νερό στο κυτταρόπλασμα	61
9.2.3 Νερό στα χυμοτόπια	61
10. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΦΥΤΟ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ	63
10.1 Το επίπεδο νερού στα φυτά	63
10.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΝΕΡΟΥ ΣΤΑ ΚΥΤΤΑΡΑ	67
10.3 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΟΣΜΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΠΑΡΓΗΣ	69
10.4 ΟΣΜΟΥΡΘΜΙΣΗ	70
10.5 Το υδατινό δυναμικό και τα συστατικά του	70
10.6 Το δυναμικό νερού σε κατάσταση υδατινής καταπόνησης	72
10.7 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ Ψ	77
10.7.1 Ψυχομετρικές τεχνικές	77
10.7.2 Τεχνική πιεστικών θαλαμών	81
11. ΕΛΕΓΧΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΠΙΕΣΤΙΚΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ	83
12. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ	86
12.1 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΜΠΛΑΣΜΑΤΙΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ $\bar{\pi}$ ΚΑΙ \bar{P}	91
13. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΙΕΣΤΙΚΩΝ ΘΑΛΑΜΩΝ....	92
13.1 ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΙΕΣΤΙΚΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ	92
13.2 ΨΥΧΡΟΜΕΤΡΙΚΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ	97
13.3 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	98
14. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	100
14.1 ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	100
14.2 ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΤΩΝ ΓΛΑΣΤΡΩΝ.....	101
14.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ.....	102
14.4 Η ΑΡΔΕΥΣΗ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΙΣ ΓΛΑΣΤΡΕΣ	102
15. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	114
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	116

1. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε με το να ελέγξουμε εάν τα φυτά έχουν την δυνατότητα να δώσουν παραγωγή, είτε πρόκειται για βιομάζα, είτε για καρπό υπό συνθήκες έλλειψης νερού. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να μελετήσουμε τους μηχανισμούς με τους οποίους αντιδρούν τα φυτά κατά την έλλειψη νερού. Ένας από αυτούς τους μηχανισμούς είναι το κλείσιμο των στομάτων κατά την διάρκεια υψηλής εξατμιστικής ζήτησης. Το φαινόμενο της οσμορύθμισης, δηλαδή η παραγωγή διαλυτών ουσιών στα κύτταρα του φυτού, δημιουργείται κατά την όσμωση για να αντιμετωπιστεί η έλλειψη του νερού. Στην εργασία μας θα μελετήσουμε το φαινόμενο της οσμορύθμισης σε φυτά C₄ όπως το γλυκό σόργο ποικιλίας Keller [*Sorghum bicolor* (L.) Moench, cv. Keller] που αναπτύσσεται σε δοχεία και σε δυο επίπεδα άρδευσης. Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο της οσμορύθμισης και το πώς γίνεται θα αναφερθούμε αρχικά στην κίνηση του νερού από το έδαφος μέσω της ρίζας στο φυτό και στο φύλλο καθώς και σε παραμέτρους που επηρεάζουν την μετακίνηση του νερού τόσο στο έδαφος όσο και στο φυτό.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι σύγχρονοι κοινωνιολόγοι αναφέρουν πως με τους σημερινούς ρυθμούς εκμετάλλευσης και λόγω της άνισης κατανομής, το νερό θα είναι σύντομα πιο σημαντικό αγαθό και από το πετρέλαιο. Κι αν σήμερα ο πόλεμος γίνεται για το πετρέλαιο, αύριο ενδέχεται να γίνεται για το νερό. Η διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες παγκόσμιες προκλήσεις, εάν θέλουμε να έχουμε βιώσιμη ανάπτυξη σήμερα αλλά και στο μέλλον. Η υπερβολική ανάπτυξη και αξιοποίηση των φυσικών πόρων, οι ανεξέλεγκτες αστικές επεκτάσεις, η βιομηχανική ρύπανση, οι γεωργικές υπερεκμεταλλεύσεις, οι ανεξέλεγκτες γεωτρήσεις και οι αλλαγές στις κλιματολογικές συνθήκες παγκοσμίως έχουν προκαλέσει τη διαδεδομένη υποβάθμιση των υδάτων. Το νερό είναι το πολυτιμότερο αγαθό στον κόσμο. Εκτός απ' το βασικό ρόλο του στον φυσικό κύκλο της ζωής αποτελεί παράλληλα και την μήτρα κάθε πολιτισμού πάνω στη γη. Στους δρόμους του νερού γεννήθηκαν και αναπτύχθηκαν οι ανθρώπινες κοινότητες και η έλλειψη ή η

υποβάθμισή του, έγινε και γίνεται ακόμα αιτία άπειρων διενέξεων και συγκρούσεων μεταξύ των κρατών.

Το νερό είναι ταυτόχρονα και ανεπαρκές αγαθό. Παρ' όλο που καλύπτει το 70% του πλανήτη, μόνο 2,5 % όλων των υδάτινων αποθεμάτων είναι γλυκό και από αυτό το 1% του γλυκού νερού, που προέρχεται από ποτάμια, λίμνες και υπόγεια νερά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πόσιμο.

Τα τελευταία χρόνια όμως υπάρχει μείωση του υδάτινου δυναμικού από διάφορες αιτίες, την κύρια ευθύνη όμως την έχει ο ανθρώπινος παράγοντας. Στην Ευρώπη οι υδάτινοι πόροι υπόκεινται σε πίεση λόγω της σχετικά υψηλής πυκνότητας των πληθυσμών, της σημαντικής βιομηχανικής δραστηριότητας και της εντατικής γεωργικής παραγωγής. Η εφαρμογή του νερού σε πολλές διαδικασίες έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ποσότητας του. Οι σημαντικότερες αιτίες γι αυτό είναι οι εξής:

Η υπεράντληση των υπογείων αποθεμάτων για αυξανόμενες αγροτικές καλλιέργειες, η χρησιμοποίηση του πόσιμου νερού για τις ανάγκες της βιομηχανίας, η αλόγιστη κατανάλωσή του για οικιακές χρήσεις από τα νοικοκυριά, ο αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός, η ραγδαία ερημοποίηση πολλών περιοχών, η αποψίλωση των δασών κλπ., έχουν ως αποτέλεσμα το επικίνδυνο χαμήλωμα του παγκόσμιου υδροφόρου ορίζοντα, χωρίς να διαφαίνονται στον ορίζοντα προοπτικές αναζωογόνησής του.

Επιπλέον οι κλιματολογικές συνθήκες έχουν αλλάξει δραματικά τα τελευταία χρόνια λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας και έχουν επιφέρει αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας, μείωση των βροχοπτώσεων, ακραία μετεωρολογικά φαινόμενα κτλ. Όλα τα παραπάνω συνεισφέρουν στην μείωση των υδάτινων πόρων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον άνθρωπο.

Όμως προβληματική παραμένει και η ποιότητα του πόσιμου νερού. Η ρύπανση των επιφανειακών νερών και κυρίως του υδροφόρου ορίζοντα από τις εκπλύσεις λιπασμάτων ή φυτοφαρμάκων είναι από τις πιο σοβαρές, αφού το 80% των παγκοσμίων αποθεμάτων νερού χρησιμοποιείται στη γεωργία. Η διοχέτευση τοξικών και ρυπασμένων λυμάτων από τη βιομηχανία σε υδάτινους αποδέκτες χωρίς προηγούμενος να έχει γίνει κατάλληλη επεξεργασία, η έλλειψη πληροφόρησης, η αδιαφορία, η ανευθυνότητα μαζί με την απουσία ελέγχων και την επιβολή κυρώσεων από την πολιτεία στους υπεύθυνους για τη ρύπανση των υδάτων συμπληρώνουν την απαισιόδοξη εικόνα για το μέλλον του νερού.

Στη χώρα μας τα κύρια προβλήματα που έχουν εντοπισθεί κατά καιρούς από επιστημονικά ιδρύματα και αρμόδιους φορείς είναι η λειψυδρία που οφείλεται σε υπερκατανάλωση, κυρίως στην τουριστική περίοδο, η υπεράντληση για καλλιέργειες και κυρίως για υδροβόρες καλλιέργειες, όπως το βαμβάκι, που καθιστά τα υπόγεια νερά και τα υδροφόρα συστήματα ελλειμματικά. Ακόμα η υποβάθμιση μεγάλων ποσοτήτων υπόγειων αποθεμάτων από τη θαλάσσια διείσδυση στις παράκτιες ζώνες και τα νησιά, όπου εκτός των άλλων μετατρέπει το νερό σε υφάλμυρο, ακόμα η ρύπανση των υδάτινων αποδεκτών, όπου τα λύματα βιομηχανικά ή οικιακά καταλήγουν εντελώς ή ελλιπώς ανεπεξέργαστα.

Μερικές περιοχές έχουν το πλεονέκτημα να διαθέτουν κάποια υδατικά αποθέματα, περισσότερα από άλλες περιοχές. Όμως τα τελευταία χρόνια φαίνεται πως κι εδώ παρατηρούνται ελλείμματα, πράγμα που ανάγκασε τη πολιτεία να προβεί σε μέτρα. Δυστυχώς σε αρκετά χωριά δεν υπάρχει ακόμα κεντρικό δίκτυο αποχέτευσης και τα λύματα, ακόμα και βοθρολύματα, να διοχετεύονται ελεύθερα στην ύπαιθρο και να μολύνουν τους υδάτινους αποδέκτες και τον υδροφόρο ορίζοντα. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την δημιουργία προγραμμάτων διαχείρισης του νερού κυρίως σε αυτό που χρησιμοποιούν οι αγρότες. Αυτές οι μελέτες διαχείρισης του νερού στηρίζονται σε μελέτες εξαμυσοδιαπνοής των καλλιεργειών κατά την αξιολόγηση τους στις υπό μελέτη περιοχές. Έπειτα μελετούνται οι καλλιέργειες και η περίπτωση αλλαγής αυτών με άλλες που απαιτούν λιγότερο νερό για ανάπτυξη, ή καλλιέργεια υβριδίων που αντέχουν σε μειωμένη άρδευση. Αξιολογώντας όλα τα παραπάνω είναι δυνατόν να εφαρμοστεί μια ορθή πολιτική διαχείρισης των υδάτινων πόρων.

Ένα άλλο θέμα που προκύπτει είναι η τιμολόγηση του νερού που είναι ένα δύσκολο εγχείρημα εφόσον πρέπει να καθοριστεί το κόστος με βάση το πόσο κοστίζει η παραγωγή του νερού και η πρόσβαση σε αυτό. Το θέμα της τιμολόγησης άπτεται στο κόστος χρήσης του νερού από τις αγροτικές εκμεταλλεύσεις αφού η γεωργική παραγωγή αποτελεί κινητήρια δύναμη για πολλές οικονομίες του κόσμου. Είναι σημαντικό να υπάρξει συνεργασία μεταξύ των κρατών και των οργανισμών διαχείρισης του αρδευτικού νερού ώστε να υπάρχει σωστή διαχείριση των υδάτινων πόρων.

Πολλές χώρες εκτελούν εκτεταμένα προγράμματα κατασκευής φραγμάτων και τεχνητών δεξαμενών ύδατος για την συγκράτηση του νερού. Αντιθέτως τα φράγματα δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα στη ρίζα τους επειδή αποτελούν μια τεράστια παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον, οδηγούν σε ανακατατάξεις πληθυσμών, αλλά και εντείνουν τη δυσπιστία των χωρών που γειτνιάζουν αφού οι χώρες που φτιάχνουν τα φράγματα έχουν και τον ουσιαστικό έλεγχο της ροής των υδατικών όγκων στις άλλες περιοχές. Ακόμα οι διαρκής άρδευση των εδαφών έχει ως αποτέλεσμα την αλατότητα και την εξαντλωσή τους. Οι χώρες, με ξηρές κλιματολογικές συνθήκες επενδύουν συστηματικά στη βελτίωση της τεχνογνωσίας για την οικονομικότερη αφαλάτωση του θαλασσινού νερού. Ενώ όμως η ποσότητα του γλυκού νερού μειώνεται, η απατήσεις για νερό διαρκώς αυξάνονται ειδικά στην γεωργία και την βιομηχανία. Ο υπερπληθυσμός της γης οδηγεί στην αύξηση των αγροτικών προϊόντων. Έτσι οι καλλιέργειες πρέπει να αυξηθούν και να αποδώσουν το μέγιστο κάνοντας χρήση όλο και περισσότερου νερού. Για την οικονομία και την μείωση της σπατάλης του νερού στις αγροτικές καλλιέργειες εφαρμόζουμε ειδικές αρδευτικές μεθόδους όπως την στάγδην άρδευση και υπόγεια άρδευση στις ρίζες των φυτών. Νέες μέθοδοι καλλιέργειας σε θερμοκήπια όπου τα φυτά αναπτύσσονται σε ελεγχόμενο περιβάλλον, συμβάλουν στην ορθότερη και χωρίς απώλειες άρδευση τους όπως βλέπουμε στην εικόνα 1 . Ακόμα η επιβολή αυστηρών κανονισμών στην διάνοιξη γεωτρήσεων και η προγραμματισμένη άρδευση επιφέρει μια δίκαιη εφαρμογή του νερού σε όλους τους παραγωγούς.

Τέλος σε εργαστήρια δημιουργούνται νέες ποικιλίες φυτών ώστε να είναι ανθεκτικές σε συνθήκες ξηρασίας ή γίνονται μελέτες από ερευνητές για να παρακολουθήσουν τους μηχανισμούς των φυτών στο να αντιμετωπίζουν την έλλειψη νερού και το πώς μπορούν να τους εκμεταλλευτούν.



Εικόνα 1. Αρδευόμενες καλλιέργειες μέσα στην έρημο της Καλιφόρνια, οι οποίες αναπτύσσονται μόνο με τη βοήθεια ειδικών μεθόδων άρδευσης αφού το κλίμα είναι ξηρό και άnuδpo. (Microsoft encyclopedia)

Εκτός των τεχνικών εφαρμογής του νερού οι ερευνητές στρέφονται στην δημιουργία ειδικών τεχνικών για την καλλιέργεια φυτών όπου θα έχουν την ίδια απόδοση ακόμα και σε συνθήκες λειψυδρίας. Για να δούμε αν τα φυτά έχουν την δυνατότητα να παράγουν και υπό συνθήκες έλλειψης νερού, θα πρέπει να μελετήσουμε τους μηχανισμούς με τους οποίους αντιδρούν στην έλλειψη νερού και το αν μπορούν να επιζήσουν. Ένας από αυτούς τους μηχανισμούς είναι το κλείσιμο των στομάτων, η οσμορύθμιση δηλαδή η παραγωγή διαλυτών ουσιών στα κύτταρα του φυτού για να αντιμετωπίσουν την έλλειψη νερού. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στο φυτό να εκμεταλλευτεί και να απορροφήσει το ελάχιστο πόσο νερού που υπάρχει στο έδαφος. Στην εργασία μας θα μελετήσουμε το φαινόμενο της οσμορύθμισης σε φυτά C₄ γλυκού σόργου ποικιλίας Keller [*Sorghum bicolor* (L.) Moench, cv. Keller που αναπτύσσονται σε δοχεία και σε δυο επίπεδα άρδευσης. Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο της οσμορύθμισης και το πώς γίνεται θα αναφερθούμε αρχικά στην κίνηση του νερού από το έδαφος μέσω της ρίζας στο

φυτό και στο φύλλο. Το φυτό με την αύξηση της εξατμιστικής ζήτησης προσλαμβάνει όλο και περισσότερο νερό μέσω των ριζών από το έδαφος. Το νερό του δίνει τα απαραίτητα συστατικά για την επιβίωση του και την περαιτέρω ανάπτυξη του, που οδηγεί στην απόδοση του καρπού.

Το ερώτημα που τίθεται είναι μήπως η μείωση της εδαφικής υγρασίας ή του διαθέσιμου νερού στο έδαφος επιφέρει ανάλογη μείωση στην ανάπτυξη του φυτού και στην απόδοση του καρπού. Αν η μείωση της εδαφικής υγρασίας συνεχιστεί και φτάσει κοντά στο σημείο μόνιμης μάρανσης μήπως το φυτό μαραθεί;

Αν το φυτό δεν μαραθεί τότε σημαίνει πως έχει έναν μηχανισμό ώστε να μπορεί να επιβιώσει και όταν η τιμή του διαθέσιμου εδαφικού νερού βρίσκεται κοντά στο σημείο μόνιμης μάρανσης. Αυτός ο μηχανισμός είναι που του επιτρέπει να εκμεταλλευτεί την ελάχιστη εδαφική υγρασία και να απορροφήσει το νερό από το έδαφος. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται οσμоруθμιση και στην εργασία μας θα ελέγξουμε αν τα φυτά C_4 όπως το αραποσίτι, το σόργο κ.τ.λ διαθέτουν αυτόν τον μηχανισμό. Στην εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με το γλυκό σόργο το οποίο θα αναπτυχθεί μέσα σε δοχεία και με την εφαρμογή δυο επιπέδων άρδευσης.

3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

4. ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος ρυθμίζει τα ποσοστά διήθησης, ανεφοδιασμού των ριζών και της ροής στα υπόγεια ρεύματα. Το εδαφικό νερό δεν είναι καθαρό, αλλά αποτελείται από ένα σύνθετο διάλυμα ανόργανων συστατικών που περιλαμβάνει διάφορα χημικά συστατικά για την ανάπτυξη ενός φυτού και συμπεριφέρεται ως διάλυμα νερού εμπλουτισμένο με ιόντα μετάλλων. Ως εκ τούτου, πρέπει να γίνει μια διάκριση μεταξύ της μετακίνησης όγκου ή μάζας εδαφολογικού διαλύματος και της μετακίνησης του καθαρού νερού ως υδρατμός. Το εδαφολογικό διάλυμα διηθείται προς τα κάτω μέσω του μη τριχοειδούς πορώδους με ροή όγκου ή μάζας υπό την επιρροή της βαρύτητας. Η κίνηση γίνεται μέσω των τριχοειδών πορωδών και των μεμβρανών που περιβάλλουν τα εδαφολογικά μόρια κάτω από την επιρροή επιφανειακής τάσης ή μητρικών δυνάμεων.

Συχνά λέγεται ότι το νερό κινείται πάντα προς τις περιοχές χαμηλότερου συνολικού υδάτινου δυναμικού, αλλά αυτό δεν ισχύει πάντα. Το συνολικό υδάτινο δυναμικό, ή το θερμοδυναμικό δυναμικό, περιλαμβάνει όλες τις δυνάμεις που έχουν επιπτώσεις στο ενεργειακό επίπεδο του νερού αλλά αυτές οι δυνάμεις δεν σημαντικές κατά τη μετακίνηση του νερού μέσα στο έδαφος. Παρόλο που το οσμωτικό δυναμικό είναι ένα σημαντικό συστατικό του συνολικού δυναμικού του εδαφικού νερού στα αλατούχα εδάφη, έχει λίγη επίδραση στη μετακίνηση του νερού στο έδαφος, το οποίο ελέγχεται από δυνάμεις μητρικές και βαρύτητας. Όποτε, το οσμωτικό δυναμικό έχει επιπτώσεις στη μετακίνηση του νερού από το έδαφος προς τις ρίζες των φυτών επειδή το εδαφικό διάλυμα χωρίζεται από το κυτταρικό διάλυμα της ρίζας σε διαφορετικές διαπερατές μεμβράνες. Κατά συνέπεια, φαίνεται ότι η κίνηση του νερού μέσω του εδάφους δεν είναι πάντα κατά μήκος των μεταβολών στο συνολικό δυναμικό νερού, αλλά είναι μετακίνηση από το έδαφος στις ρίζες. Αυτό εξηγεί το γεγονός ότι οι δύο φάσεις νερού, η υγρή και αέρια, μπορούν να κινηθούν ανεξάρτητα η μια από την άλλη, κάθε μια κατά μήκος της μεταβολής της στο δυναμικό.

4.1 Κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος

Το βασικό μέσο για την ανάπτυξη της ρίζας και την αποθήκευση του νερού είναι το έδαφος, όπου είναι επίσης η πηγή των ορυκτών θρεπτικών ουσιών και παρέχει την βάση στήριξης για τα φυτά. Επιπλέον, περιέχει έναν δραστήριο πληθυσμό μικροοργανισμών, γαιοσκωλήκων, και μικρών εντόμων που έχουν σημαντικά αποτελέσματα κατά την ανάπτυξη της ρίζας, με επιπτώσεις στην απορρόφηση του νερού και την ανάπτυξη των φυτών.

4.1.1 Χαρακτηριστικά του εδάφους

Το έδαφος είναι ένα μίγμα όπου αποτελείται σε διάφορα ποσοστά από τα τεσσάρα κύρια συστατικά του.

Αυτά είναι:

1. η ανόργανη ύλη
2. η οργανική ουσία που διαμορφώνει το μητρικό πέτρωμα
3. το εδαφικό διάλυμα
4. ο αέρας που καταλαμβάνει το διάστημα των πόρων μέσα στο μητρικό.

Εκτός από αυτά τα τέσσερα συστατικά, το έδαφος περιέχει πολυάριθμους οργανισμούς όπως βακτηρίδια, μύκητες, άλγη, πρωτόζωα κτλ.

Η υφή του εδάφους είναι βασισμένη σχετικά με την αναλογία σε άμμο, πυλό, και άργιλο όπου υπερισχύει σε ένα μέρος εδάφους. Τα εδάφη είναι ταξινομημένα ως αμμώδες, πηλώδες και αργιλώδες. Το λιγότερο σύνθετο έδαφος είναι η άμμος όπου διαμορφώνει σχετικά απλά τριχοειδή συστήματα και εξασφαλίζει καλή αποστράγγιση και αερισμό.

Το πορώδες διαμορφώνει ένα συνεχές αλλά γεωμετρικά σύνθετο σύστημα όπου αποτελεί συνήθως το 30-60% του συνολικού όγκου του εδάφους. Μπορεί να γεμίσει εξ ολοκλήρου με νερό, όπως στα κορεσμένα εδάφη, ή κατά μεγάλο μέρος με αέρα, όπως στα ξηρά εδάφη. Ο υψηλός βαθμός συνοχής του εδάφους κατά την άρδευση είναι σπουδαίος όσον αφορά την μετακίνηση του νερού και των αλάτων στις ρίζες του φυτού.

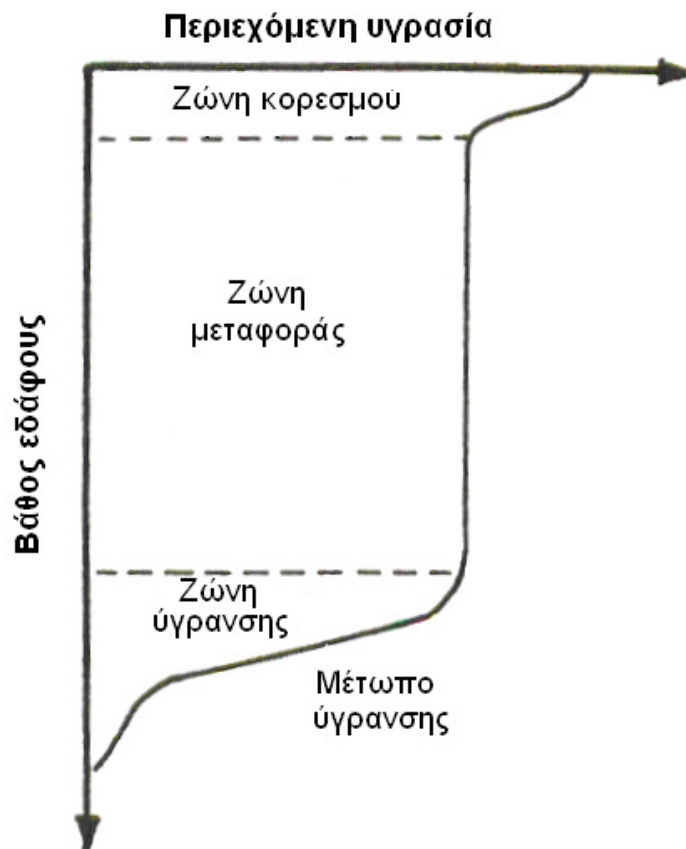
4.1.2 Δομή του πορώδους

Το πορώδες είναι το μέρος του εδαφικού όγκου που καταλαμβάνεται από αέρα και νερό. Ανέρχεται περίπου στο μισό του συνολικού όγκου του εδάφους, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο και την επεξεργασία του εδάφους. Ο συνολικός όγκος του πορώδους είναι λιγότερο σημαντικός από τα ποσοστά του τριχοειδούς και του μη τριχοειδούς πορώδους. Το μη τριχοειδές πορώδες είναι το μέρος όπου το νερό στραγγίζει από τη βαρύτητα, και παρέχεται αέρας στο κενό όπου είναι τόσο σημαντικός για τον αερισμό της ρίζας. Το τριχοειδές πορώδες αναφέρεται στο μέρος του πορώδους που αποτελείται από πόρους διαμέτρου 30-60 μm και κρατούν το νερό ενάντια προς την βαρύτητα. Αυτό καθορίζει το ποσό του διαθέσιμου νερού που διατηρείται σε ένα έδαφος μετά από μια βροχόπτωση ή μια άρδευση.

Η μεγάλη μη τριχοειδής χωρητικότητα των αμμωδών εδαφών οδηγεί στην καλύτερη στράγγιση και τον αερισμό τους, αλλά οδηγεί επίσης σε μια χαμηλότερη ικανότητα αποθήκευσης του διαθέσιμου νερού. Σε ένα αποδοτικό έδαφος για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος και της διατήρησης του νερού, το πορώδες είναι εξίσου διαιρεμένο μεταξύ των μεγάλων μη τριχοειδών και μικρών τριχοειδών πορώδων.

4.2 Είσοδος του νερού μέσα στο έδαφος

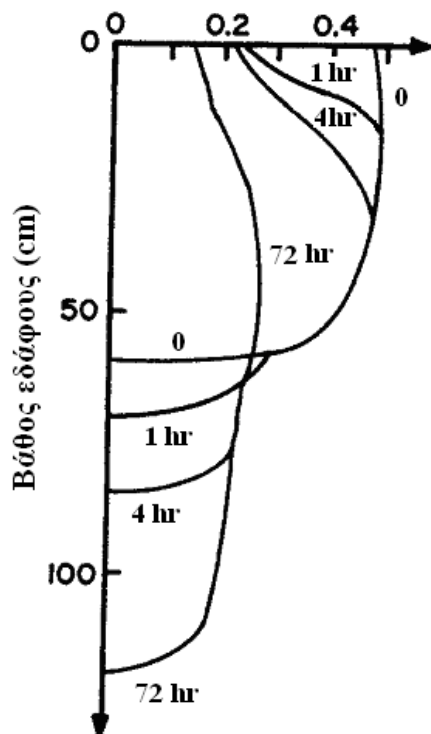
Αφού εφαρμοστεί βροχόπτωση ή άρδευση, το νερό στην επιφάνεια του εδάφους κινείται προς τα κάτω μέσω της διήθησης. Η κατανομή του διηθούμενου νερού στο βάθος του εδάφους, εξετάζεται ως κατατομή υγρασίας, όπου ακολουθεί μια γενική πορεία όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 2. Ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους υπάρχει μια περιορισμένη ζώνη κορεσμού που ακολουθείται από μια ζώνη μεταφοράς όπου έχει σχεδόν σταθερή περιεκτικότητα σε νερό.



Εικόνα 2. Τυπικό δείγμα μιας τομής εδάφους όπου κατανέμεται η υγρασία κατά την διήθηση του νερού. (Water stress on plants, G. M. Simpson)

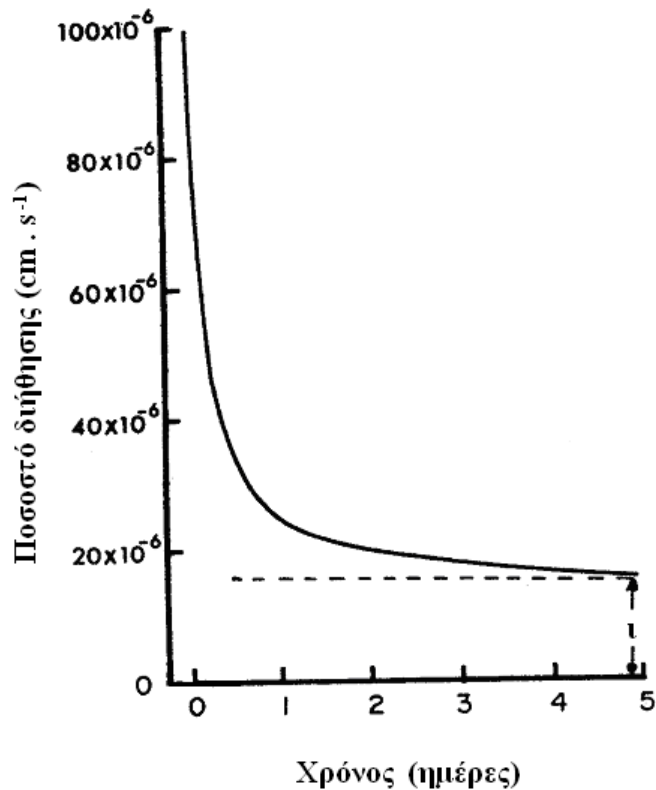
Το νερό κινείται από τη ζώνη μεταφοράς προς τη ζώνη ύγρανσης όπου σημειώνονται αλλαγές του περιεχόμενου νερού ως προς το βάθος και το χρόνο. Στο κατώτατο σημείο της ζώνης ύγρανσης υπάρχει ένα αισθητά καθορισμένο μέτωπο ύγρανσης, όπου είναι το όριο μεταξύ του υγρού και ξηρού εδάφους. Το προφίλ της υγρασίας αλλάζει με το χρόνο από την στιγμή που σταμάτησε η διήθηση με έναν τρόπο όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.

Περιεχόμενο νερό εδάφους ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)



Εικόνα 3. Προφίλ υγρασίας κατά την ανακατανομή του εδαφικού νερού μετά την διήθηση σε στρώμα εδάφους. (Water stress on plants, (G. M. Simpson)

Η ζώνη μεταφοράς εμβαθύνετε συνεχώς με μια συνακόλουθη προς τα κάτω μετακίνηση της ζώνης και του μετώπου ύγρανσης. Το τελευταίο γίνεται λιγότερο απότομο καθώς κινείται βαθύτερα. Όταν το ποσοστό παροχής νερού μέσω της άρδευσης ή της βροχής υπερβαίνει την ταχύτητα της εδαφικής διήθησης αρχίζει η απορροή του νερού στην επιφάνεια όπου είναι ανεπιθύμητη στην γεωργία. Η ταχύτητα διήθησης αυξάνεται αφού εφαρμοστεί νερό στην επιφάνεια, έτσι ώστε να επιτυγχάνει μια αρκετά σταθερή ελάχιστη τιμή i μετά από έναν ορισμένο χρονικό διάστημα όπου είναι η τιμή της τελικής διηθητικότητας όπως φαίνεται στην εικόνα 4. Η εδαφολογική δομή και σύσταση ασκούν μια σημαντική επιρροή στην ταχύτητα διήθησης του νερού.



Εικόνα 4. Ρυθμός διήθησης νερού στο έδαφος σε χρονικό διάστημα. (Water stress on plants, (G. M. Simpson)

4.2.1 Υδατοικανότητα εδάφους

Η υδατοικανότητα, είναι η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό μετά από την στράγγιση του νερού βαρύτητας όπου έχει γίνει αργή και η περιεκτικότητα του νερού έχει γίνει σχετικά σταθερή. Αυτή η κατάσταση διαρκεί συνήθως αρκετές ημέρες αφότου έχει υγρανθεί πλήρως το έδαφος από βροχόπτωση ή άρδευση. Σε μερικά εδάφη η αργή στράγγιση συνεχίζεται για πολλές ημέρες. Η υδατοικανότητα του εδάφους εμπεριέχει ακόμα την κανονική χωρητικότητα της υγρασίας και την τριχοειδή χωρητικότητα. Αν και τα βαθιά και αμμώδη εδάφη φθάνουν στην υδατοικανότητα του εδάφους μάλλον γρήγορα, η παρουσία της στάθμης νερού ή ενός στεγανού στρώματος κοντά στην επιφάνεια θα παρατείνει το χρόνο που απαιτείται για την στράγγιση. Η έλλειψη ομοιογένειας στο έδαφος έχει επιπτώσεις επίσης στην περιεκτικότητα σε νερό και στην υδατοικανότητα του εδάφους.

Επειδή η υδατοικανότητα του εδάφους επηρεάζεται από το προφίλ του εδάφους και την εδαφολογική δομή, οι εργαστηριακοί προσδιορισμοί της δεν είναι πάντα αξιόπιστοι δείκτες της τιμής στον αγρό.

4.2.2 Σημείο μόνιμης μάρανσης

Είναι το σημείο της περιεκτικότητας σε εδαφικό νερό στα οποία τα φυτά παραμένουν μαραμένα εκτός αν προστίθεται νερό στο έδαφος. Μετρήσεις σε διάφορα φυτά διαπίστωσαν ότι όλα μαράθηκαν στην ίδια σχεδόν περιεκτικότητα σε νερό σε ένα δεδομένο έδαφος. Διαπιστώθηκε ότι το δυναμικό εδαφικού νερού στη μάρανση κυμάνθηκε από -1,0 μέχρι -2,0 MPa, με μέσο όρο περίπου το 1,5 MPa, όπου χρησιμοποιείται γενικά ως προσέγγιση του εδαφολογικού νερού στη μόνιμη μάρανση. Η απώλεια του νερού αναγκάζει τα κύτταρα των φύλλων να χάσουν την σπαργή τους. Αυτό εξαρτάται από το οσμωτικό δυναμικό του ιστού των φύλλων, τις καιρικές συνθήκες που έχουν επιπτώσεις στο ποσοστό διαπνοής, και από τους εδαφολογικούς παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στο ποσοστό της απορρόφησης.

4.2.3 Άμεσα διαθέσιμο νερό

Η διαθεσιμότητα του εδαφολογικού νερού για την ανάπτυξη των φυτών, είναι το ποσό νερού που διατηρείται σε ένα έδαφος μεταξύ της υδατοικανότητας εδάφους και του σημείου μόνιμης μάρανσης. Δεδομένου ότι η υδατοικανότητα του εδάφους αντιπροσωπεύει το ανώτερο όριο της διαθεσιμότητας του εδαφικού νερού και το σημείο μόνιμης μάρανσης το χαμηλότερο όριο, αυτό το εύρος έχει ιδιαίτερη σημασία στον καθορισμό της γεωργικής αξίας των εδαφών.

Γενικά, το έδαφος με λεπτή σύσταση έχει ένα ευρύτερο φάσμα σε νερό μεταξύ της υδατοικανότητας εδάφους και του σημείου μόνιμης μάρανσης σε αντίθεση με τα χοντρή σύστασης εδάφη. Τα εδάφη με λεπτή σύσταση δείχνουν μια πιο βαθμιαία απελευθέρωση του νερού με αντίστοιχη μείωση του δυναμικού εδαφικού νερού σε αντίθεση με τα αμμώδη εδάφη όπου απελευθερώνουν μεγαλύτερο μέρος του νερού τους μέσα σε ένα στενό εύρος του δυναμικού λόγω της υπεροχής των μεγάλων πόρων.

Η διαθεσιμότητα του νερού εξαρτάται από διάφορες μεταβλητές όπως το αυξανόμενο βάθος ριζώματος που μπορεί να αντισταθμίσει ένα περιορισμένο εύρος του διαθέσιμου νερού σε ένα ή περισσότερα στρωματά. Αντιθέτως, το περιορισμένο ριζικό σύστημα που συνδυάζεται με ένα περιορισμένο εύρος διαθέσιμου νερού οδηγεί σε κίνδυνο την ανάπτυξη των φυτών με αποτέλεσμα μια ανεπαρκή παροχή

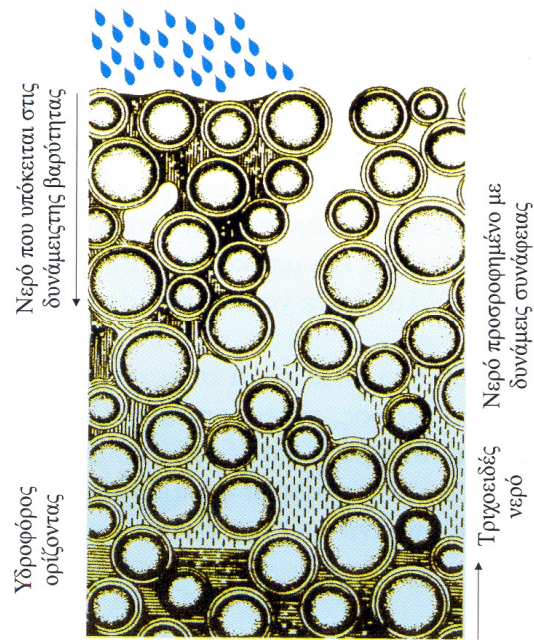
νερού, ειδικά στα κλίματα όπου είναι συχνές οι καλοκαιρινές ξηρασίες. Επιπλέον, ο βαθμός διαθεσιμότητας τείνει συνήθως να μειωθεί όσο η περιεκτικότητα σε εδαφικό νερό και $\Psi_{\text{εδάφους}}$ μειώνεται. Τέλος το εύρος του εδαφικού νερού μεταξύ της υδατοικανότητας εδάφους και του σημείου μόνιμης μάρανσης αποτελεί έναν σημαντικό γεωργικό χαρακτηριστικό του εδάφους όταν ερμηνεύεται σωστά.

4.3 Κατανομή του νερού στο έδαφος

Αφού εφαρμοστεί νερό στην εδαφική επιφάνεια, διεισδύει και στραγγίζει προς τα κάτω μέσω των μεγαλύτερων εδαφικών πόρων λόγω της ροής από την βαρύτητα. Εντούτοις, μερικό νερό συγκρατείται από τις τριχοειδείς δυνάμεις σε μικρότερους πόρους και από την προσρόφηση στις επιφάνειες των εδαφολογικών μορίων.

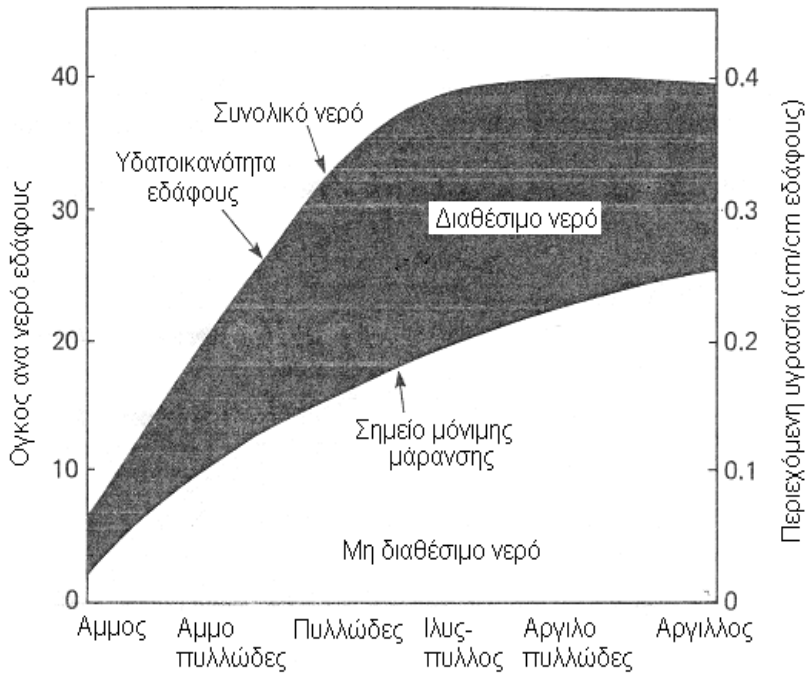
Στην εικόνα 5 το έδαφος αριστερά είναι μετά από δυνατή βροχή. Το νερό έχει εκτοπίσει τον αέρα και τα φυτά καταπονούνται από έλλειψη O_2 στις ρίζες. Οι δυνάμεις της βαρύτητας σύντομα παρασύρουν την περίσσεια του νερού προς τον σχετικά μόνιμο υδροφόρο ορίζοντα. Μετά την εξισορρόπηση των ανωτέρω δυνάμεων δεξιά, κοντά στην επιφάνεια εδάφους παραμένει το νερό ως λεπτή ταινία γύρω από τα σωματίδια του εδάφους, συγκρατούμενο από δυνάμεις συνάφειας. Πιο κάτω, ο συνδυασμός δυνάμεων, συνάφειας και συνοχής αντισταθμίζει τις δυνάμεις της βαρύτητας, όποτε τριχοειδές νερό γεμίζει τα διάκενα.

Αυτές αποτελούν τις μητρικές δυνάμεις και κρατούν ένα μέρος του διαθέσιμου εδαφικού νερού στα φυτά. Το μεταβαλλόμενο μέρος του μητρικού νερού κρατιέται τόσο σταθερά και κινείται τόσο αργά όπου αντιμετωπίζεται ως μη διαθέσιμο στα φυτά.



Εικόνα 5. Δυνάμεις βαρύτητας, συνάφειας και συνοχής στην κατανομή του νερού στο έδαφος. (Φυσιολογία φυτών από το μόριο στο περιβάλλον, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης)

Τα σχετικά ποσά διαθέσιμου και μη διαθέσιμου νερού στο έδαφος από αμμώδες μέχρι και αργιλώδες παρουσιάζονται στην εικόνα 6. Τα ποσά εκφράζονται ως ποσοστά του εδαφικού όγκου και ως cm του νερού ανά cm εδάφους.



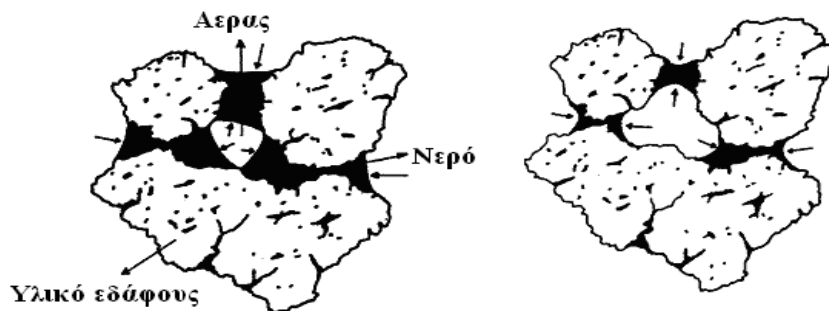
Εικόνα 6. Διάγραμμα που παρουσιάζει τα σχετικά ποσά διαθέσιμου και μη διαθέσιμου νερού από αμμώδες μέχρι και αργιλώδες έδαφος. (Water relations of plants, Paul J. Kramer)

4.4 Δυνάμεις που συγκρατούν το νερό στο έδαφος

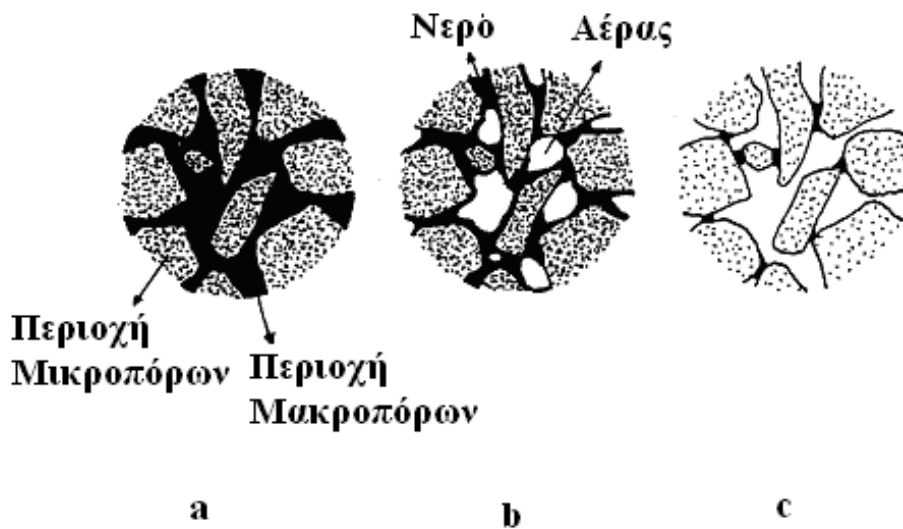
4.4.1 Δυνάμεις στις επαφές νερού και αέρα

Τα λεπτής υφής εδάφη έχουν μικρότερους πόρους από τα χονδροειδή και μεσαία εδάφη. Το εδαφικό νερό συγκρατείται ενδιάμεσα του παρακείμενου υλικού εδάφους όπως φαίνεται στην εικόνα 7. Στο περισσότερο ξηραμένο επίπεδο (δεξιά) η καμπυλότητα του μηνίσκου αυξάνεται και στα δυο επίπεδα όπως βλέπουμε στα σημεία που σημειώνονται με βέλη.

Επιπλέον στην εικόνα 8 παρουσιάζονται διάφορες μορφές της ξήρανσης σε υλικά εδάφους όπως: (a) κατά τον κορεσμό όπου οι μακροπόροι και οι μικροπόροι γεμίζουν με νερό. (b) όταν ο αέρας εισάγεται στο έδαφος τότε η συνέχιση του νερού μέσα στους μακροπόρους διακόπτεται, ενώ οι μικροπόροι παραμένουν ακόμα κορεσμένοι. Επιπλέον στο (c) η ξήρανση προκαλεί περιορισμό του νερού των μακροπόρων στο μηνίσκο μεταξύ των παρακείμενων τριμμάτων ενώ οι ίδιοι οι μικροπόροι αρχίζουν να γίνονται ακόρεστοι.



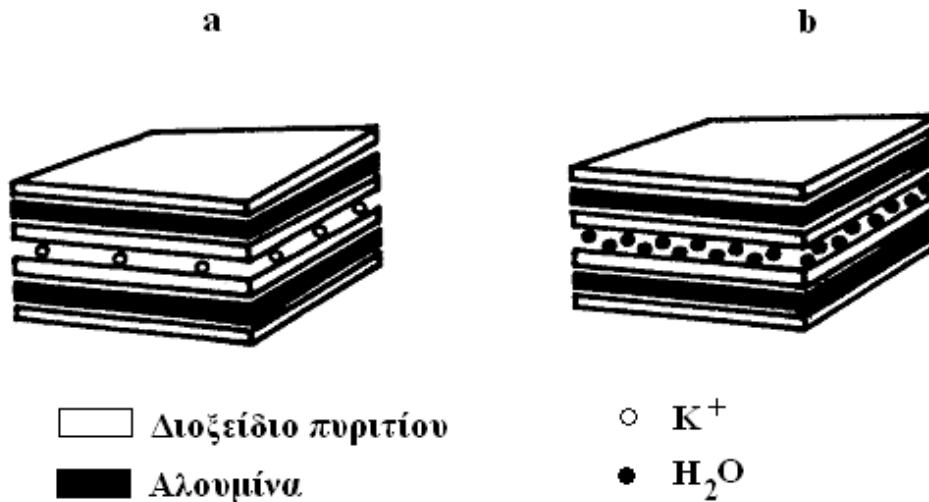
Εικόνα 7. Συγκράτηση εδαφικού νερού ανάμεσα στα υλικά εδάφους σε δυο επίπεδα ενυδάτωσης. (Water stress on plants, G. M. Simpson)



Εικόνα 8. Διάφορες μορφές ξήρανσης ανάμεσα στα υλικά εδάφους. (Water stress on plants, G. M. Simpson)

4.4.2 Δυνάμεις στις επαφές του νερού και στερεού σώματος.

Ο δεύτερος μηχανισμός συγκράτησης του νερού προκύπτει κυρίως στα αργιλώδη εδάφη όπου η διόγκωση και η σμίκρυνση αυτών των εδαφών συνοδεύεται από την ενυδάτωση και την ξήρανση τους αντίστοιχα. Αυτές οι αλλαγές στον όγκο είναι αποτέλεσμα της δομής των υλικών της αργίλου. Οι διάφοροι τύποι υλικών αργίλου χαρακτηρίζονται με βάση τον τρόπο που τα φύλλα πυριτίου και αλουμινίου είναι συνδεδεμένα και συσσωρευμένα μαζί όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 9, η διάταξη του στρώματος διοξειδίου του πυριτίου και της αλουμίνης για δυο τύπους αργιλωδών συστατικών. Σε αδιατάρακτο ιλλίτη τα καλιούχα κατιόντα εισάγονται μεταξύ των διπλανών διοξειδίων του πυριτίου και κρατούνται από αρκετά δυνατούς χημικούς δεσμούς για να προλάβουν τον χωρισμό και την διόγκωση. Στον διογκούμενο μοντμοριλλονίτη αντίθετα από τον καλιούχο, τα γραμμομόρια νερού εισάγονται μεταξύ των συστατικών του διοξειδίου του πυριτίου, προκαλώντας χωρισμό και διόγκωση της αργίλου.



Εικόνα 9. Διάταξη στρώματος διοξειδίου του πυριτίου και αλουμίνας σε (a) αδιατάρακτο ιλλίτη και (b) διογκούμενο μοντμοριλλονίτη. (Water stress on plants, G. M. Simpson)

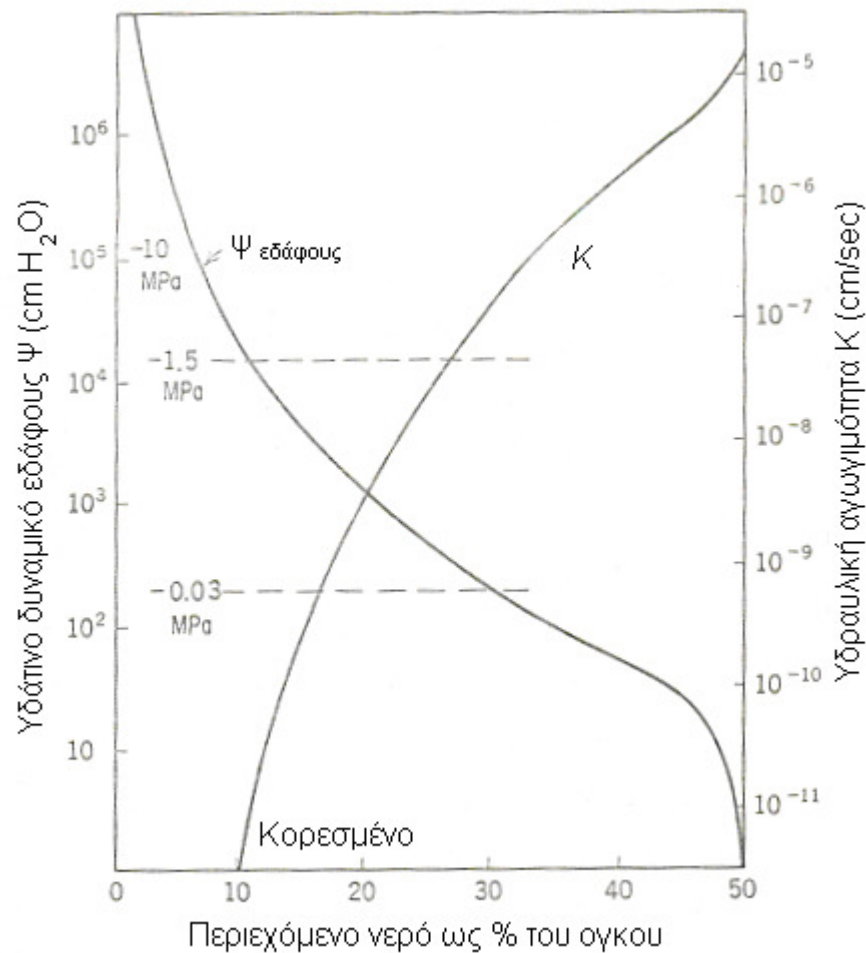
Οι άργιλοι με υψηλό ποσοστό μοντμοριλονίτη ή βερμικουλίτη χαρακτηρίζονται από μεταβολές του όγκου τους κατά τις αλλαγές στην περιεκτικότητα του νερού τους. Τέτοια εδάφη αναπτύσσουν συχνά ευρείες ρωγμές κατά τη διάρκεια των παρατεταμένων ξηρασιών.

Στα εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, η πλήρωση και η εκκένωση των πόρων κατά την ύγρανση και την ξήρανση μπορούν να είναι λιγότερο σημαντικές από τον στόμφο και την στενότητα. Κατά συνέπεια, σε αντίθεση με τα αμμώδη εδάφη, η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης του εδαφικού νερού εξαρτάται λιγότερο από την δομή των πόρων του εδάφους και περισσότερο από τη κατανομή του μεγέθους και τις ιδιότητες των μορίων της αργίλου.

4.4.3 Εδαφική αγωγιμότητα

Οι τιμές για την υδραυλική αγωγιμότητα κυμαίνονται από 0,0025 cm/hr στα ελάχιστα διαπερατά έως 25 cm/hr στο πολύ διαπερατά εδάφη. Τα εδάφη με μια υδραυλική αγωγιμότητα λιγότερο από 0,25 cm/hr δεν αποστραγγίζονται καλά, ενώ εκείνα με υδατοπερατότητες μεγαλύτερες από 25 cm/hr δεν κρατούν αρκετό νερό για την καλή ανάπτυξη των φυτών. Η διαπερατότητα και η αγωγιμότητα μειώνονται σε

μειωμένο πορώδες και είναι ευαίσθητες στις αλλαγές στην περιεκτικότητα σε κατιόντα, οι οποίες έχουν επιπτώσεις στο βαθμό διόγκωσης των κολλοειδών της αργίλου όπως φαίνεται στην εικόνα 10. Η παγίδευση του αέρα με το φράξιμο των εδαφικών πόρων μειώνει κατά πολύ τη διαπερατότητα, ενώ η μείωση στη θερμοκρασία, δεν αυξάνει το ιξώδες του νερού. Τέλος η αγωγιμότητα στο ξηρό έδαφος περιορίζει την παροχή του νερού στις ρίζες.



Εικόνα 10. Διάγραμμα που παρουσιάζει κατά προσέγγιση την μείωση στην υδραυλική αγωγιμότητα (K) και το δυναμικό του εδαφολογικού νερού (Ψ) με τη μείωση της περιεκτικότητας σε εδαφικό νερό. (Water relations of plants, Paul J. Kramer, ACADEMIC PRESS INC 1983.)

4.5 Κίνηση υδρατμού στο έδαφος

Δεδομένου ότι το περιεχόμενο εδαφικό νερό μειώνεται, η συνοχή των υγρών μεμβρανών σπάει, ώστε τελικά το νερό να κινείται κυρίως υπό μορφή υδρατμού. Αν και η μετακίνηση του υδρατμού στο έδαφος είναι πολύ αργή, εμφανίζεται γρηγορότερα από ότι αναμενόταν από τους υπολογισμούς των ποσοστών διάχυσης. Αυτή η απόκλιση αποδίδεται στο γεγονός ότι μέρος της πορείας του νερού μέσω του εδάφους είναι σε υγρή μορφή, έτσι το νερό συμπυκνώνεται στην μια επιφάνεια και εξατμίζεται από την άλλη επιφάνεια των μεμονωμένων σφηνοειδών σχηματισμών του νερού. Επίσης διαπιστώθηκε ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας στους γεμισμένους με αέρα πόρους είναι δύο φορές πιο απότομη από τη μέση μεταβολή της θερμοκρασίας στην εδαφική μάζα. Αυτοί οι δύο παράγοντες οδηγούν σε ένα ποσοστό μετακίνησης υδρατμού γρηγορότερο από το θεωρητικά αναμενόμενο.

Στο περιβάλλον υπάρχουν μεγάλες εποχικές διακυμάνσεις στην εδαφική θερμοκρασία. Η επιφάνεια όπου θερμαίνεται το καλοκαίρι και δροσίζεται το χειμώνα, σχετίζεται με τους βαθύτερους ορίζοντες. Κατά συνέπεια, μπορεί να υπάρξει σημαντική ανοδική μετακίνηση του νερού το χειμώνα και μετακίνηση προς τα κάτω το καλοκαίρι. Τέτοια μετακίνηση υποτίθεται ότι εμφανίζεται ως υδρατμός, αλλά μπορεί η μετακίνηση νερού κατά μήκος των θερμικών μεταβολών να εμφανιστεί και ως υδρατμός και ως υγρό.

4.6 Εξάτμιση, ανοδικές και οριζόντιες κινήσεις του νερού

Η ανοδική μετακίνηση του νερού μέσα στο έδαφος εμφανίζεται επειδή η εξάτμιση και η απορρόφηση από τα φυτά μειώνουν το περιεχόμενο νερό του επιφανειακού εδάφους, ώστε να μειώνεται το δυναμικό του νερού και να προκαλείται ανοδική μετακίνηση ενάντια στη βαρύτητα. Υποθέτοντας ένα σταθερό ποσοστό εξάτμισης, το ποσοστό ανοδικής μετακίνησης σε μια εκτεθειμένη εδαφική επιφάνεια εξαρτάται από το βάθος της στάθμης του νερού και την εδαφική σύσταση.

Υπό ευνοϊκές συνθήκες για γρήγορη εξάτμιση, η απώλεια του νερού μπορεί να υπερβεί το ποσοστό στο οποίο το νερό μπορεί να κινηθεί προς την επιφάνεια και

η εδαφική επιφάνεια γίνεται ξηρή. Αυτό είναι πλέον πιθανό να εμφανιστεί στα αμμώδη εδάφη επειδή περιέχουν λιγότερο νερό ανά μονάδα όγκου του εδάφους και έχουν μια μικρότερη διάβαση για τη ροή του νερού ανά μονάδα του τμήματος σε σχέση με την άργιλο. Η εξάτμιση μειώνεται δραστικά αφότου η εδαφική επιφάνεια γίνεται ξηρή επειδή η μετακίνηση μέσω του επιφανειακού στρώματος ως υδρατμός είναι πολύ πιο αργή από τη μετακίνηση ως υγρό.

Επίσης παρατηρείται ανοδική μετακίνηση του νερού στο έδαφος κάτω από την υδατοικανότητα εδάφους. Τέτοια μετακίνηση του νερού πρέπει να ληφθεί υπόψη στην εξέταση του ποσού του διαθέσιμου νερού στα φυτά που ριζοβολούν στο εδαφική επιφάνεια. Αν εμφανίζεται σημαντική ανοδική μετακίνηση του νερού στη ριζική ζώνη όπως παρουσιάζεται στην θα υποτιμηθεί η χρήση του νερού που βασίζεται σε διαδοχικές μετρήσεις του νερού ως προς το περιεχόμενο εδαφικό νερό. Η εξάτμιση οδηγεί συχνά στην υπερβολική συγκέντρωση άλατος στην επιφάνεια των αλατούχων εδαφών. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στη δυνατότητα για μειωμένη απώλεια εξάτμισης με ρηχό όργωμα ή με προστατευτικό στρώμα.

4.7 Μέτρηση της εδαφικής υγρασίας

Για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας περιγράφονται έξι τεχνικές. Η βαρομετρική ανάλυση, οι μετρήσεις εκπομπής νετρονίων και η reflectometry χρονικών περιοχών (TDR) μετράνε την περιεκτικότητα σε εδαφική υγρασία. Τα τασίμετρα και οι φραγμοί αντίστασης, μετρούν το μητρικό δυναμικό των εδαφών ως αναλογία του δυναμικού του εδαφικού νερού ενώ η μέθοδος, που χρησιμοποιεί εδαφικά ψυχρόμετρα, μετρά το δυναμικό του εδαφικού νερού. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι συγκρίσεις των τεχνικών για τη μέτρηση του υδάτινου δυναμικού εδάφους και περιεχόμενης υγρασίας εδάφους.

4.7.1 Βαρομετρική περιεκτικότητα σε νερό

Η απλούστερη μέτρηση του εδαφικού νερού είναι αυτή της βαρομετρικής εδαφικής περιεκτικότητας σε νερό. Αυτή η τιμή καθορίζεται με την ξήρανση του συλλεχθέντος εδαφικού δείγματος στους 100-110 °C σε σταθερό βάρος. Αν και είναι πολύ απλή, είναι μια καταστρεπτική διαδικασία δειγματοληψίας και δεν μας δείχνει τίποτα για τη διαθεσιμότητα του νερού στα φυτά. Η διαθεσιμότητα είναι καθορισμένη αρχικά από την ενεργειακή θέση του νερού στο χώμα.

4.7.2 Έλεγχος νετρονίων

Η αρχή αυτής της μεθόδου μέτρησης είναι ότι τα γρήγορα νετρόνια επιβραδύνονται όταν χτυπούν σε ένα σώμα παρόμοιας μάζας, όπως ένας πυρήνας υδρογόνου. Η ενέργεια από το νετρόνιο μεταδίδεται στο πρωτόνιο, και το αναπηδούμενο νετρόνιο είναι πολύ πιο αργό. Αυτή η αρχή έχει προσαρμοστεί για να υπολογίσει την πυκνότητα των πυρήνων υδρογόνου στο έδαφος. Στα περισσότερα εδάφη ο όγκος του υδρογόνου συνδέεται με το εδαφικό νερό, αν και στα οργανικά εδάφη ή σε πυκνά ριζοβολημένα εδάφη, αυτό μπορεί να μην συμβεί. Τα γρήγορα νετρόνια εκπέμπονται από μια πηγή και κατευθύνονται από έναν σωλήνα που εγκαθίσταται στο έδαφος, ενώ αναπηδούν αργά πίσω σε έναν ανιχνευτή όπου μέτρα

κάτω από την πηγή. Ο αριθμός των αργών νετρονίων που ανιχνεύεται είναι ανάλογος προς τον αριθμό των συγκρούσεων μεταξύ των πυρήνων νετρονίων και υδρογόνου, τα οποία απεικονίζουν στη συνέχεια την περιεκτικότητα σε εδαφικό νερό.

Αυτή η τεχνική είναι καταλληλότερη για βαθιά λεπτό-κατασκευασμένα εδάφη όπου οι τρύπες και οι σωλήνες εγκαθίστανται πιο εύκολα. Ανάλογα με τις εδαφολογικές ιδιότητες, την περιεκτικότητα σε εδαφικό νερό και το τύπο της περίπτωσης, χρησιμοποιείτε δείγμα ελέγχου νετρονίων σε ακτίνα 10-30 cm.

Σε όλες τις περιπτώσεις, πρέπει να παίρνεται προσοχή για να αποτραπεί παρατεταμένη ανθρώπινη έκθεση στα γρήγορα νετρόνια που προκαλούν μια σημαντική πηγή κίνδυνου για την υγεία του ανθρώπου.



Εικόνα 11. Αισθητήρας για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας. (Από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών).

Πίνακας 1. Συγκριτικές απόψεις για τις τεχνικές μέτρησης του υδάτινου δυναμικού και περιεχόμενης υγρασίας εδάφους. Water in environment, (Philip Rundel, Wesley Jarrelli)

Τεχνική	Εύρος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Τασίμετρο	-0,00 έως - 0,08 MPa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Άμεση ανάγνωση του εδάφους 2. Ανέξοδη 3. Μπορεί να αυτοματοποιηθεί για συνεχή ανάγνωση 4. Σχετικά αξιόπιστη 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Απαιτεί SMCC για να συσχετιστεί με εδαφικό περιεχόμενο νερό 2. Δειγματοληψία μικρών τμημάτων εδάφους, κοντά στο κύπελλο 3. Μπορεί να χάσει την λειτουργία του αν είναι ξηρότερο από -0,20 MPa 4. Μετράει μόνο το μητρικό δυναμικό, όχι του διαλύματος 5. Εκθέτει την ευαισθησία του οργάνου σε ταραχή
Ψυχρόμετρο	-0,20 έως - 10 MPa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Μετράει συνολικό υδάτινο δυναμικό 2. Μπορεί να αυτοματοποιηθεί για συνεχή παρατήρηση 3. Χρήσιμη πάνω σε ευρεία κλίμακα δυναμικών, ειδικά σε πολύ ξηρά εδάφη 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Δείγματα πολύ μικρού κλάσματος από συνολικό όγκο εδάφους 2. Σχετική ευαισθησία σε μεταβολές θερμοκρασίας 3. Απαιτεί SMCC για την μετατροπή της τιμής σε εδαφικό περιεχόμενο νερό 4. Μπορεί να αδρανοποιηθεί από αλατότητα 5. Συσκευές αρκετά ακριβές

Φραγμοί αντίστασης	-0,10 έως - 7,0 MPa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Βαθμονομούνται σε δυναμικά ύδατος εδάφους 2. Αξιόπιστη 3. Ανέξοδη, εύκολης κατασκευής 4. Μπορεί να αυτοματοποιηθεί για παρατήρηση 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Απαιτεί SMCC για την μετατροπή της τιμής σε εδαφικό περιεχόμενο νερό 2. Πρέπει να βαθμονομηθεί ιδιαίτερα 3. Δείγματα μικρού όγκου εδάφους 4. Δεν λειτουργεί ικανοποιητικά σε αλατούχα συστήματα
Έλεγχος νετρονίων	0,02 έως 0,50 kg νερού kg ⁻¹ εδάφους	<ol style="list-style-type: none"> 1. Δίνει άμεσες αναγνώσεις για την περιεχόμενη εδαφική υγρασία 2. Δειγματοληψία μεγάλου όγκου εδάφους 3. Μια μονάδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές θέσεις 4. Σχετικά ακριβής 5. Μικρό τμήμα πάνω από την επιφάνεια εδάφους 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ιδιαίτερη βαθμονόμηση σε κάθε τύπο εδάφους για ακρίβεια 2. Δύσκολο να χρησιμοποιηθεί σε αυτόματη παρατήρηση 3. Χρήση κοντά στην επιφάνεια απαιτεί ειδική τεχνική 4. Εξοπλισμός ιδιαίτερα ακριβός 5. Βαθμονόμηση με SMCC αμφισβητείτε σε διαδοχικά στρώματα

Βαρομετρικό περιεχόμενο νερό	Πλήρες εύρος περιεχομένου νερού	1. Χαμηλές απαιτήσεις εξοπλισμού 2. Αξιόπιστη εξήγηση	1.Καταστρεπτική δειγματοληψία 2.Συλλογή και μεταφορά λογιστικών 3.Ευαίσθητη σε μικρής κλίμακας μεταβολές του χώρου
Ρεφλεκτρομετρία χρονικής διάρκειας	0,065 έως 0,50 kg νερού kg ⁻¹ εδάφους	1.Μετράει περιεχόμενο νερό 2. Δείγματα μεγάλου όγκου εδάφους, μείωση παρεμβολής από ετερογενήσιμο (heterogeneity)	1. Απαιτεί υψηλή αρχική επένδυση 2. Εισαγωγή των ηλεκτήρων μπορεί να είναι δύσκολη 3. Μπορεί η δειγματοληψία να χρειαστεί υπερβολικό μεγάλο όγκο εδάφους

4.7.3 Τασίμετρα

Τα τασίμετρα χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μέτρηση της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας όπου το $\Psi_{\text{συνολικό}}$ είναι υψηλό. Αυτές οι συσκευές είναι απλές και ανέξοδες, καθιστώντας της ιδιαίτερα χρήσιμες όταν πρέπει να απαιτηθούν πολλές αγροτικές μελέτες. Στην λειτουργία τους, τα τασίμετρα μετράνε την εδαφική απορρόφηση ή το μητρικό δυναμικό που αναπτύσσεται όταν το νερό εξάγεται από ένα κεραμικό κύπελλο στο έδαφος από της μητρικές δυνάμεις. Το κεραμικό κύπελλο σφραγίζεται σε έναν γεμάτο με νερό σωλήνα. Το κενό που αναπτύσσεται μετριέται χρησιμοποιώντας ένα κανονικό μανόμετρο ή μανόμετρο υδραργύρου. Σε καθεμία περίπτωση, το κενό που λαμβάνεται υποτίθεται ότι ήταν ίσο με το μητρικό δυναμικό του νερού στο χώμα.

Τα τασίμετρα είναι απολύτως ανεπαίσθητα στο οσμωτικό δυναμικό του εδαφικού διαλύματος και έτσι δεν παράσχουν ακριβείς μετρήσεις του υδάτινου εδαφικού δυναμικού σε εδάφη με σημαντική αλατότητα.

Τα τασίμετρα, συνήθως που αποτελούνται από έναν απλό σωλήνα, που συναρμολογείται στο ένα άκρο του ένα κεραμικό κύπελλο και στο άλλο ένας μετρητής κενού, έχουν χρησιμοποιηθεί κατά πολύ για να υπολογίσουν το μητρικό εδαφικό δυναμικό ή την απορρόφηση. Χρησιμοποιούνται συχνά σε συνδυασμό με τον έλεγχο νετρονίων, τα πλακίδια αντίστασης ή τα ψυχρόμετρα για να καλύψουν πλήρως το εύρος του περιεχόμενου εδαφικού νερού. Πρόσφατη έρευνα έχει επιφέρει βελτίωση των μεθόδων για το συνεχή έλεγχο και την καταγραφή των στοιχείων στα τασίμετρα με ένα ανέξοδο σύστημα συνεχής καταγραφής δεδομένων.

4.7.4 Πορώδες πλακίδια ηλεκτρικής αντίστασης

Τα πλακίδια ηλεκτρικής αντίστασης παρέχονται με μια συσκευή για τη μέτρηση του μητρικού δυναμικού των εδαφών σε αναλογία με το συνολικό δυναμικό του εδαφικού νερού. Η λειτουργία τους είναι βασισμένη στο γεγονός ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα πολλών υλικών ποικίλλει ως συνάρτηση της περιεκτικότητας σε νερό. Το συνηθέστερο είναι τα πλακίδια του στερεού γύψου που περιέχουν δύο ενσωματωμένα ηλεκτρόδια. Η αγωγιμότητα μέσω των πλακιδίων αυξάνεται καθώς η ποσότητα εδαφικού νερού που απορροφάται από το πλακίδιο αυξάνεται, ενώ το διάλυμα συγκέντρωσης άλατος (κορεσμένος γύψος) παραμένει σταθερός.

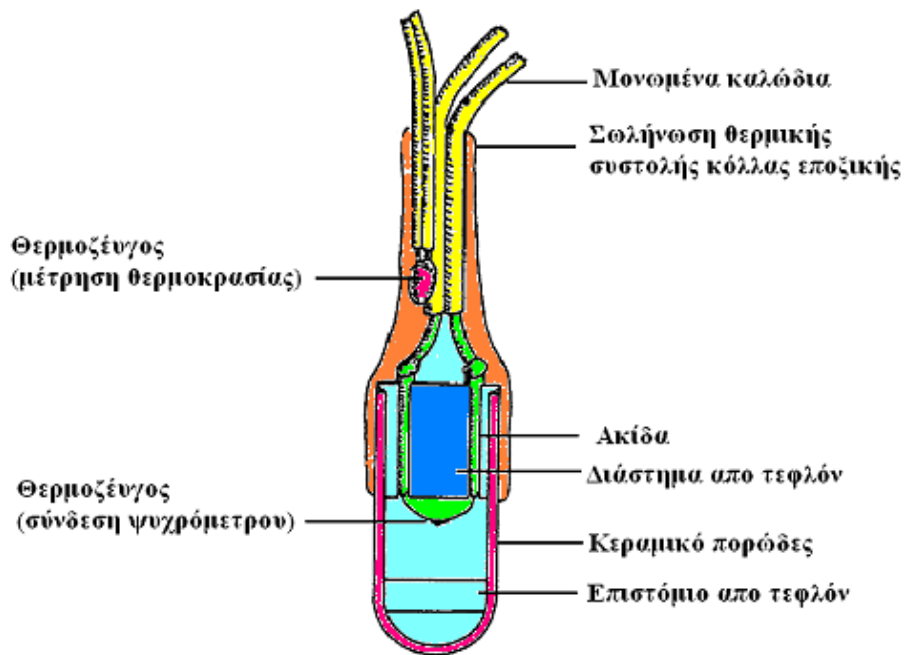
Κατά την λειτουργία τους, οι μετρήσεις γίνονται με τη σύνδεση ενός ωμόμετρου με τα ηλεκτρόδια του φραγμού αντίστασης. Η αντίσταση είναι ανάλογη με την ποσότητα νερού στο πλακίδιο, η οποία εξαρτάται στη συνέχεια από το βαθμό στον οποίο το πλακίδιο ανταγωνίζεται με το χώμα για την πληρεξούσια του νερού. Τα πλακίδια είναι επίσης κατασκευασμένα από φίμπεργκλας και άλλα υλικά, αλλά δεδομένου ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του εδαφικού διαλύματος είναι μια λειτουργία της σύνθεσής τους, δεν λειτουργούν καλά στα αλατούχα χώματα ή όπου εφαρμόζεται αλατούχο νερό στην άρδευση.

Επειδή ο χρόνος απόκρισης των πλακιδίων αντίστασης είναι αργός, δεν είναι χρήσιμα για μέτρηση γρήγορη ύγρανσης. Τα πλακίδια γύψου μπορούν να χρησιμεύσουν ως μια τοπική πηγή ασβεστίου και θειικού οξέος, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν όπου έχει επιπτώσεις αυτό το στοιχείο στην αύξηση των φυτών.

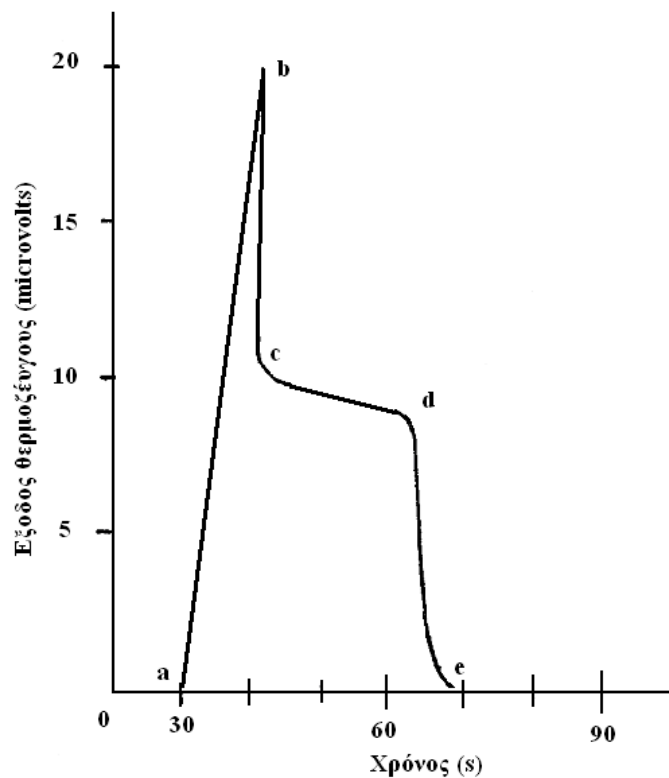
4.7.5 Εδαφικά ψυχρόμετρα

Το συνολικό δυναμικό εδαφικού νερού (μητρικό και οσμωτικό δυναμικό) μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας εδαφικά ψυχρόμετρα. Αυτά είναι χαρακτηριστικά ψυχρόμετρα θερμοηλεκτρικών ζευγών που περιβάλλονται σε έναν κεραμικό βολβό. Ο βολβός επιτρέπει την ισορρόπηση μεταξύ του εδαφικού διαλύματος και της ατμόσφαιρας μέσα στο βολβό. Στην ισορροπία, η σχετική υγρασία μέσα στο βολβό είναι ίση με αυτήν της εδαφικής ατμόσφαιρας. Δεδομένου ότι οι μητρικές και οι διαλυτής ουσίας δυνάμεις συμβάλλουν στη σχετική υγρασία ισορροπίας, όπου η συσκευή μετρά το συνολικό δυναμικό εδαφικού νερού, παραλείποντας οποιεσδήποτε υπερπιέσεις.

Τα ψυχρόμετρα θερμοηλεκτρικών ζευγών είναι αποτελεσματικά σε μέτρια ξηρά και ξηρά εδάφη ένα τέτοιο φαίνεται στην εικόνα 12. Σε υγρά εδάφη η υγρασία είναι τόσο κοντά στον κορεσμό και για μετρήσεις που γίνονται συνήθως, σε εδάφη άνω από - 0,2 MPa δεν μπορεί να ελεγχθούν με ακρίβεια. Τέλος, επειδή η σχετική υγρασία επηρεάζεται από την θερμοκρασία, οι απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας στο χώμα ή σε ανακριβείς μετρήσεις θερμοκρασίας, μπορεί να καταστήσουν εσφαλμένα αποτελέσματα. Μια μέτρηση ψυχρόμετρου που φαίνεται στην εικόνα 13 είναι η παραγωγή μικροτάσης ανά χρονικό διάστημα σε ψυχρομετρικό θερμοζεύγος εδάφους κατά τον ψυχρομετρικό τρόπο της λειτουργίας του. Το σημείο c στην επικλινή περιοχή κόρου αντιστοιχεί στην ισορροπία θερμοκρασίας υγρού-βολβού, και το σημείο d στην κένωση του συνοπτικού νερού στην σύνδεση.



Εικόνα 12. Δομή ενός τυπικού ψυχρόμετρου εδάφους. (Water in the environment, P. Rundel, W. Jarrell)



Εικόνα 13. Παραγωγή μικροτάσης ανά χρονικό διάστημα σε ψυχρομετρικό θερμοζέυγος εδάφους κατά την λειτουργία του. (Water in the environment, P. Rundel, W. Jarrell)

4.7.6 Ρεφλεκτρομετρία χρονικής περιοχής (reflectometry, TDR).

Η μέτρηση της περιεκτικότητας μάζας σε εδαφικό νερό είναι η πιο επιθυμητή για τις μελέτες ισορροπίας του νερού στον αγρό. Όσο περισσότερος είναι ο όγκος του εδάφους που επιλέγεται με μια δεδομένη τεχνική, τόσο μικρότερη είναι η επίδραση της ετερογένειας σε μικρή κλίμακα στις μετρημένες τιμές. Για αυτούς τους λόγους, μια νέα τεχνική αποκαλούμενη ρεφλεκτρομετρία χρονικής-περιοχής (TDR) παρουσιάζει μια υπόσχεση για τις μετρήσεις της περιεκτικότητας σε εδαφικό νερό. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά των εδαφικών συστατικών ποικίλλει άμεσα με την περιεκτικότητα σε εδαφικό νερό. Η διηλεκτρική σταθερά είναι ανάλογη προς το χρονικό διάστημα που απαιτείται για έναν παλμό τάσης να περάσει μέσω ενός γνωστού μήκους εδάφους. Η εδαφική διηλεκτρική σταθερά μετριέται με ομοαξονικά καλώδια που προσανατολίζονται κάθετα ή οριζόντια με χάλκινες ή ανοξειδωτού χάλυβα ράβδους. Έχει αναπτυχθεί μια εμπειρική σχέση μεταξύ της διηλεκτρικής σταθεράς και της περιεκτικότητας σε εδαφικό νερό.

Οι οριζόντιες ράβδοι έχουν βρεθεί ότι έχουν τα χαμηλότερα τυποποιημένα σφάλματα από τις κάθετες ράβδους. Οι ράβδοι διαμέτρου 3 και 6 χιλιοστών εμφανίζονται επαρκείς, με το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούνε πειραματική προετοιμασία διάνοιξης οπής έναντι των ράβδων διαμέτρου 12,7 χιλιοστών. Η καταγραφή του TDR μπορεί να ληφθεί με έναν ελεγκτή καλωδίων ή έναν συνδυασμό παλμογράφου, γεννήτριας παλμών και κεφαλής δειγματοληψίας.

Η εδαφική σύσταση, η πυκνότητα, η θερμοκρασία και η περιεκτικότητα άλατος έχει σχετικά μικρή επίδραση στη μέτρηση.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής είναι:

- 1) το δείγμα όγκου εδάφους είναι αναφορικά μεγάλο,
- 2) συχνότερες μετρήσεις, σε κάθε εποχιακή αύξηση,
- 3) ικανότητα στον υπολογισμό της εδαφικής αλατότητας καθώς επίσης και στην περιεκτικότητα σε νερό.

Τα μειονεκτήματα που περιλαμβάνουν είναι:

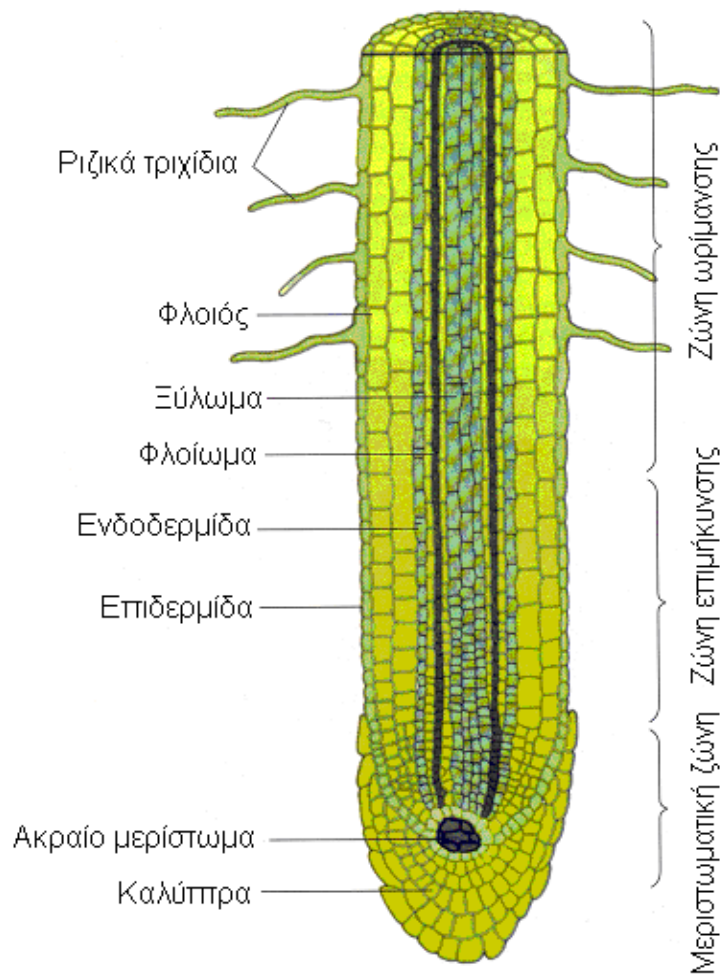
- 1) έλλειψη καλής βάσης δεδομένων για την κατανόηση των ανωτέρων σχέσεων πόσο γενικές είναι,
- 2) δεν υπάρχει πρότυπος εξοπλισμός,
- 3) κάποια ασυνεπή αποτελέσματα κοντά στην επιφάνεια,

Με την περαιτέρω ανάπτυξη, αυτή η τεχνική μπορεί να εκπληρώσει την υπόσχεσή της, για μεγαλύτερης κλίμακας ακριβή μέτρηση νερού, ειδικά στις κοινότητες φυτών όπου το διάστημα των φυτών είναι μικρό σε σχέση με το μήκος, όπως σε λιβάδια ή εκτάσεις καλλιεργειών .

5. ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΡΙΖΑ

5.1 Κίνηση του νερού από το έδαφος στο ριζικό σύστημα

Καθώς το νερό διηθείται στο έδαφος μέρος αυτού κινείται προς το ριζικό σύστημα του φυτού. Το νερό εισέρχεται στο ριζικό σύστημα από τα ριζικά τριχίδια και μέσω διάφορων διόδων μεταφέρεται στο κύριο σώμα του φυτού όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 14.

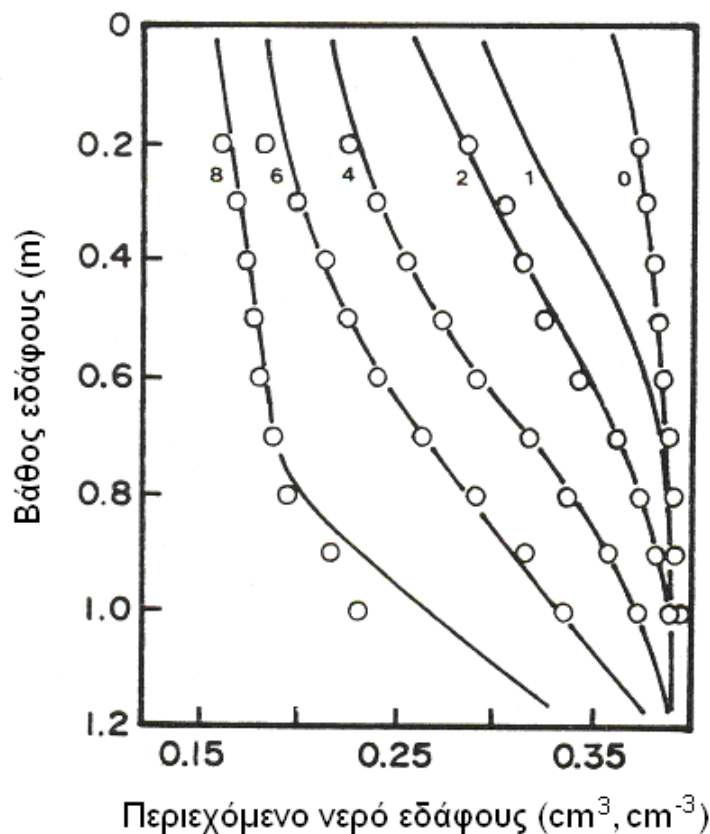


Εικόνα 14. Διάγραμμα μιας τομής κατά μήκος της ρίζας. Η πρόσληψη του νερού γίνεται από την περιοχή των ριζικών τριχιδίων, όπου η επιφάνεια που εκτίθεται στο εδαφικό νερό είναι σημαντικά μεγαλύτερη. (Φυσιολογία φυτών από το μόριο στο περιβάλλον. Β. Γαλατης, Δ. Γανωτακης, Κ. Γκανη –Σπυροπουλου, Γ.Καραμπουρνιωτης, Κ. Κοτζαμπασης, Ι. Κωνσταντινιδου, Ι Μανετας, Κ. Ρουμπελακη-Αγγελακη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης)

Η μετακίνηση του νερού μέσα στο φυτό γίνεται σε μικρές και μεγάλες αποστάσεις. Στις μεγάλες αποστάσεις επικρατούν δυο διαδικασίες. Είναι το ρεύμα διαπνοής όπου μεταφέρει το νερό και τις διαλυμένες ουσίες από την ρίζα στον βλαστό και το ρεύμα των προϊόντων αφομοίωσης που παράγονται κατά την φωτοσύνθεση, καθοδικά από τον βλαστό προς την ρίζα και ανοδικά προς τις κορυφές των βλαστών, τους καρπούς και τα αλλοφυτικά μέρη. Χαρακτηρίζονται ως αγγεία και ξήλωμα για το ρεύμα της διαπνοής και ηθμοσωλήνες στο φλοιό για το ρεύμα των προϊόντων της αφομοίωσης.

Η διαφορά δυναμικού του νερού μεταξύ της ρίζας και του εδάφους ($\Psi_s - \Psi_r$) διαδραματίζει έναν κρίσιμο ρόλο στη λήψη του νερού από τα φυτά. Για μια συνεχή παροχή νερού, είναι απαραίτητο το δυναμικό νερού ρίζας (Ψ_s) να είναι πάντα πιο αρνητικό από το δυναμικό νερού του εδάφους (Ψ_r). Κατά συνέπεια για μια αμείωτη παροχή νερού στα φυτά σε ένα ξηρό έδαφος, η πτώση στο Ψ_s πρέπει να συνοδεύεται από μια ισοδύναμη πτώση στο Ψ_r . Εντούτοις, υπάρχει ένα όριο στην αφυδάτωση όπου τα φυτά μπορούν να ανεχτούν, και ως εκ τούτου υπάρχει ένα χαμηλότερο όριο όπου το Ψ_r δεν μπορεί να υπερβεί. Τα ξερόφυτα και τα μεσόφυτα έχει αναπτύξει τους προσαρμοστικούς μηχανισμούς όπως την οσμоруθμηση όπου επιτρέπουν σε αυτά να μειώσουν το δυναμικό του νερού τους σε πολύ αρνητικές τιμές, σε εντολή για να στηριχτεί η μεταβολή δυναμικού που είναι απαραίτητη για την απορρόφηση του νερού στα πολύ ξηρά χώματα.

Η λήψη του εδαφικού νερού από τα ριζικά συστήματα υπολογίζεται με αξιοσημείωτη ακρίβεια όπως την εικόνα 15.



Εικόνα 15. Προφίλ υγρασίας στην ριζική ζώνη από μια καλλιέργεια σόργου. Οι αριθμοί στις καμπύλες είναι οι ημέρες μετά από την άρδευση. Οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά δεδομένα. (Water stress on plants, G. M. Simpson)

Η ροή του νερού από το έδαφος στο ξύλημα της ρίζας εκφράζεται από τη σχέση:

$$q = -\frac{\Psi_s - \Psi_r}{r_s + r_r} \quad (1)$$

όπου Ψ_s , Ψ_r είναι το δυναμικό εδάφους και νερού ξυλήματος ρίζας και τα r_s , r_r είναι οι αντιστάσεις στη ροή του νερού μέσω του εδάφους και του φλοιού της ρίζας, αντίστοιχα. Προφανώς, η εδαφική αντίσταση r_s είναι αμοιβαία της εδαφικής υδραυλικής αγωγιμότητας K , και ως εκ τούτου εξαρτάται έντονα από την εδαφολογική δομή και σύσταση καθώς επίσης και από την περιεκτικότητα σε εδαφικό νερό. Η αντίσταση της ρίζας r_r αυξάνεται στην διάβαση από την επιδερμίδα της ρίζας στον φλοιό έως τα αγγεία των ξυλημάτων.

6. ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΦΥΤΟ

6.1 Μορφές κίνησης του νερού και διαλυτών ουσιών στο φυτό

Το νερό και οι διαλυτές ουσίες στα κύτταρα είναι πάντα σε συνεχή κίνηση, όπου κινούνται από κύτταρο σε κύτταρο, και από ιστό σε ιστό. Περιλαμβάνονται διαφορετικοί μηχανισμοί και παράγοντες κατά την μετακίνηση του σε διαφορετικές αποστάσεις. Οι αποστάσεις ποικίλλουν, από νανόμετρα στις μεμβράνες των κυττάρων μέχρι και δεκάδες μέτρα στις ρίζες και τους βλαστούς. Κατά την μεγαλύτερη απόσταση της διάβασης, δηλαδή από το έδαφος μέχρι τα μεσόφυλλα κύτταρα των φύλλων, το νερό κινείται σε υγρή φάση.

Οι μηχανισμοί μετακίνησης του νερού μέσα στο φυτό είναι οι εξής:

- η μαζική ροή που γίνεται μετακίνηση νερού σε μεγάλες αποστάσεις εντός του φυτού
- η διάχυση όπου η κίνηση των μορίων είναι κατά μήκος μιας διαβάθμισης συγκεντρώσεων
- η ώσμωση όπου το νερό κινείται μέσω μιας ημιπερατής μεμβράνης

6.1.1 Μαζική ροή

Η μετακίνηση των υλικών από τη μάζα ή τη ροή μάζας εμφανίζεται όταν ασκείται δύναμη στην κινούμενη ουσία από κάποιο εξωτερικό αίτιο, όπως η πίεση ή η βαρύτητα. Έτσι όλα τα μόρια τείνουν να κινηθούν στην ίδια κατεύθυνση μέσα στην μάζα. Νερό και διαλυτές ουσίες κινούνται μέσω του ξυλήματος των φυτών από την ροή μάζας, που προκαλείται από μια πιθανή μεταβολή τάσης ή αρνητικής πίεσης που αναπτύσσεται στις εφιδρωμένες επιφάνειες και διαβιβάζεται στο σφρίγος ξυλημάτων από τους βλαστούς στις ρίζες. Η ροή της πίεσης στην μεταφορά των φλοιωμάτων υποθέτει ότι η μαζική ροή εμφανίζεται μέσω των ηθμοσωληνών λόγω της πίεσης που αναπτύσσεται από τη συσσώρευση των σακχάρων στο φλοιώμα των φύλλων. Η ροή του κυτοπλάσματος στα κύτταρα, μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως μαζική ροή.

6.1.2 Διάχυση

Η μετακίνηση από τη διάχυση προκύπτει από την τυχαία μετακίνηση των μορίων ή των κολλοειδών μορίων που προκαλούνται από την κινητική ενέργειά τους. Η διάχυση είναι μια θερμοδυναμική διαδικασία που λειτουργεί σε μοριακό επίπεδο, ενώ η μαζική ροή είναι μια μηχανική διαδικασία που ενεργοποιεί το μαζικό υλικό σε μακροσκοπικό επίπεδο. Είναι συχνά δύσκολο να διακρίνεις μεταξύ της μαζικής ροής και της διάχυσης, και οι δύο διαδικασίες λειτουργούν μερικές φορές ταυτόχρονα, όπως στις ρίζες των φυτών που διαπνέουν αργά. Το δυναμικό του εδαφικού νερού είναι συχνά χαμηλότερο από το οσμωτικό δυναμικό του σφρίγγους των ξυλημάτων ρίζας, έτσι το νερό αναμένεται να διασκορπιστεί έξω κατά μήκος της μεταβολής του θερμοδυναμικού δυναμικού νερού. Εντούτοις, η διαπνοή επιβάλλει μια μεγάλη μηχανική τάση στο νερό του ξυλήματος, προκαλώντας μια εισροή νερού όπου αγνοεί την οσμωτική μεταβολή. Γνωστά παραδείγματα της διάχυσης είναι η εξάτμιση των υγρών, και η απορρόφηση. Ως συμπέρασμα το φαινόμενο της διάχυσης είναι σημαντικό για τη μετακίνηση των μορίων μέσα στα φυτά. Η διάχυση σε υγρή φάση εντός των ορίων ενός κυττάρου και η διάχυση σε αέρια φάση ανεξαρτήτως αποστάσεων. Τέλος η διάχυση ανόργανων θρεπτικών στοιχείων από τη ρίζα προς το υπόλοιπο φυτό μέσω των ξυλωδών αγγείων είναι τόσο αργή, που δεν μπορεί να υποστηρίξει την επιβίωση του φυτού. Αντίθετα, μέσα στα όρια ενός κυττάρου ή ενός υποκυτταρικού οργανιδίου, η απλή διάχυση επαρκεί, επειδή διευκολύνεται από την κυτταροπλασματική ροή.

6.1.3 Ωσμωση

Το νερό, κατά τη μετακίνησή του από κύτταρο σε κύτταρο ή ακόμα και εντός του κυττάρου, είναι υποχρεωμένο να διασχίσει τις υπάρχουσες μεμβράνες. Όπως είναι γνωστό, οι μεμβράνες διαχωρίζουν τα κύτταρα και τα κυτταρικά οργανίδια και συνεισφέρουν στην απαραίτητη διαμερισματοποίηση των βιομορίων και των λειτουργιών. Αυτό γίνεται εφικτό εξαιτίας της ιδιότητας της εκλεκτικής διαπερατότητας. Δηλαδή, επιτρέπουν τη δίοδο του νερού, καθώς και μικρών και μη φορτισμένων μορίων, ενώ περιορίζουν την κίνηση μεγαλομορίων ή φορτισμένων μορίων. Η μετακίνηση των τελευταίων απαιτεί την παρουσία ειδικών πυλών

εισόδου/εξόδου. Οι πύλες αυτές είναι πρωτεΐνες που μεταβάλλουν τη μεμβράνη και τη στερεοδομή τους και διευκολύνουν ή αποτρέπουν τη δίοδο.

Γενικώς, ώσμωση ορίζεται η μετακίνηση του νερού διάμέσου μιας ημιπερατής. Είναι φανερό ότι η οσμωτική κίνηση, επειδή προϋποθέτει την ύπαρξη μεμβράνης, αφορά μετακίνηση σε μικρές αποστάσεις. Στην οσμωτική κίνηση συνεισφέρουν και η μαζική ροή και η διάχυση και η κατεύθυνσή της είναι αποτέλεσμα της συνισταμένης τους.

6.1.4 Ενεργή ή μη οσμωτική λήψη του νερού

Στις σχέσεις νερού των κυττάρων υποθέτουμε ότι όλη η ανταλλαγή του νερού μεταξύ των κυττάρων, των ιστών και του περιβάλλοντος μπορεί να εξηγηθεί από την μεταβολή κατά μήκος του δυναμικού νερού. Εντούτοις, υπάρχει ενεργός μεταφορά του νερού ενάντια στις μεταβολές του δυναμικού νερού από έναν μη οσμωτικό μηχανισμό όπου εξαρτάται από τις δαπάνες της μεταβολικής ενέργειας. Η αναπνοή και η αναεροβίωση μειώνουν τη λήψη νερού και η προσθήκη ορμόνης αυξίνης αυξάνει τη λήψη νερού.

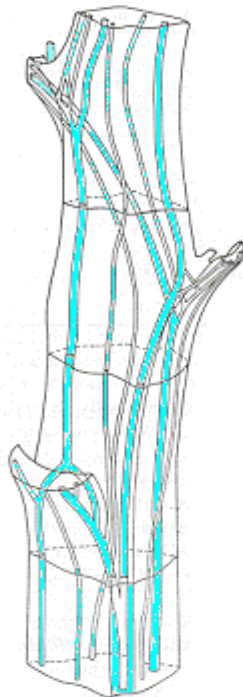
6.1.5 Θερμοκρασία και κίνηση νερού

Η αύξηση της θερμοκρασίας ως γνωστόν αυξάνει το δυναμικό νερού. Δηλώνεται ότι μια αύξηση 1°C προκαλεί μια αύξηση πάνω από 8,0 MPa υπό την έννοια ότι νερό θα αποστάξει από ένα ανοικτό διάλυμα με ένα οσμωτικό δυναμικό - 8,0 MPa σε ψυχρότερο καθαρού νερού 1°C. Αφού οι διαφορές τις θερμοκρασίας εμφανίζονται συχνά μεταξύ των διάφορων μερών του φυτού, τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας αγνοούν την πίεση, το μητρικό, και τα οσμωτικά συστατικά του δυναμικού νερού. Η θερμοκρασία έχει επιπτώσεις στη μεταφορά του νερού στις μεμβράνες μόνο όταν η αγωγιμότητα θερμότητας της μεμβράνης είναι πολύ χαμηλή και το μέγεθος των πόρων είναι πολύ μικρό. Είναι δύσκολο να διατηρηθεί μια μεταβολή θερμοκρασίας πέρα από μια μονοκύτταρη μεμβράνη ικανοποιητικού μεγέθους για να προκαλέσει μια θερμική όσμωση ενώ δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει καθόλου σε ένα σύστημα όπως το ξύλημα. Ακόμη και όταν υπάρχει μια τάση για το νερό όπου κινείται από διάχυση, από της θερμότερες προς τις δροσερές

περιοχές, όπως στα εδάφη, η θερμοδυναμική μετακίνηση της διάχυσης αντισταθμίζεται συχνά από τη μηχανική ροή της μάζας σε αντίθετη κατεύθυνση όπου προκαλείται από τις μεταβολές στην υδροστατική πίεση. Επομένως φαίνεται ότι η θερμοκρασία δεν έχει σημαντική επίδραση στη μετακίνηση του νερού στα φυτά. Τέλος η θερμοκρασία έχει επιπτώσεις στο ιξώδες του νερού και τη διαπερατότητα των μεμβρανών.

7. ΚΙΝΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΑΓΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η μετακίνηση του νερού από τη ρίζα μέχρι τα μεσόφυλλα κύτταρα των φύλλων εμφανίζεται μέσω του αγγειακού συστήματος των φυτών όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 16 το οποίο αποτελείται είτε από τα τριχίδια (γυμνόσπερμα) είτε κυρίως από κοιλότητες ξυλημάτων (αγγειόσπερμα). Η κατευθυντήρια δύναμη για την ανοδική μετακίνηση του νερού είναι η αρνητική υδροστατική πίεση (τάση) που αναπτύσσεται στο ξύλημα των φυτών. Το νερό διαμορφώνει ένα συνεχές υγρό σύστημα από το έδαφος μέχρι τις επιφάνειες εξάτμισης στο μεσόφυλλο των φύλλων. Όταν το νερό εξατμίζεται από τα κύτταρα των φύλλων, η μείωση του δυναμικού στην επιφάνεια εξάτμισης στα κυτταρικά τοιχώματα των φύλλων προκαλεί την μετακίνηση του νερού από το ξύλημα στην επιφάνεια εξάτμισης, όπου διαδοχικά μειώνει την πίεση του νερού μέσα στο ξύλημα και προκαλεί την ανύψωση του νερού. Αυτή η μειωμένη πίεση διαβιβάζεται σε όλη την συνεχή υγρή επιφάνεια της ρίζας, όπου μειώνει το δυναμικό νερού της ρίζας και προκαλεί τη λήψη του νερού από το έδαφος.



Εικόνα 16. Σύστημα αγγείων σε μίσχο πατάτας όπου φαίνεται η σύνθετη διακλάδωση στους κόμπους. (Water relations of plants, Paul J. Kramer, ACADEMIC PRESS INC 1983.)

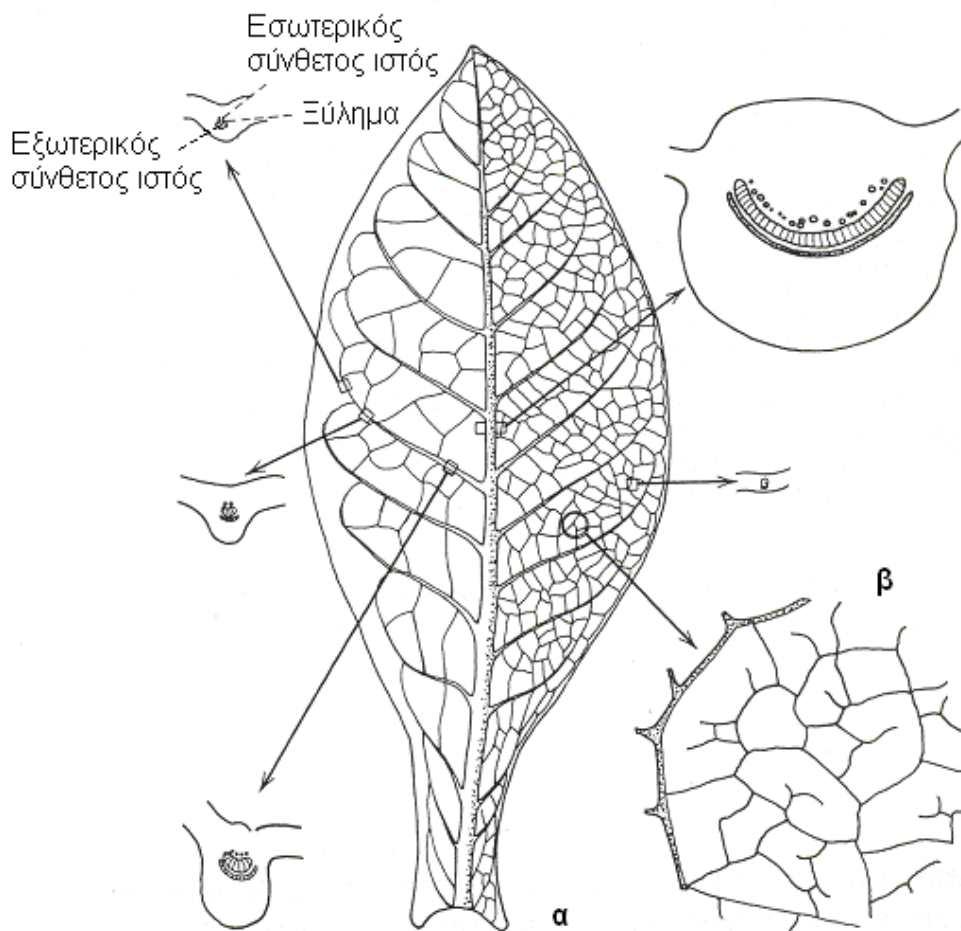
Ακόμα μπορεί να εμφανιστεί εύκολα θραύση των ηθμοσωληνών είτε από αέρια όπου έχουν μορφή φυσαλίδας ή από τους ανέμους που δημιουργούν κοιλότητες. Στην εικόνα 17 φαίνεται η κανονική και η παρακαμπτήρια ροή του νερού σε περίπτωση εμβολής ενός αγγειακού μέλους με φυσαλίδα αέρα. Στην πραγματικότητα, το περιεχόμενο της φυσαλίδας είναι κυρίως υδρατμοί υπό τάση. Οι διάτρητες πλάκες και τα βοηθία εμποδίζουν την επέκταση της φυσαλίδας. Η παραγωγή των φυσαλίδων συνοδεύεται από ελαφρότατο κρότο, που ανιχνεύεται μόνον από υπερευαίσθητα μικρόφωνα προσαρμοσμένα στον βλαστό. Όταν το υδατικό δυναμικό του εδάφους επανέλθει στα κανονικά επίπεδα, οι εμβολές σταματούν.



Εικόνα 17. Κανονική και παρακαμπτήρια ροή νερού στην περίπτωση εμβολής ενός αγγειακού μέλους με φυσαλίδα αέρα. (Φυσιολογία φυτών από το μόριο στο περιβάλλον, Β. Γαλατης, Δ. Γανωτακης , Κ. Γκανη –Σπυροπουλου, Γ.Καραμπουρνιωτης, Κ. Κοτζαμπασης, Ι. Κωνσταντινιδου, Ι Μανετας, Κ. Ρουμπελακη-Αγγελακη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης)

8. ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕΣΑ ΣΤΑ ΦΥΛΛΑ

Η μετακίνηση του νερού στα φύλλα εμφανίζεται πρώτα στο αγγειακό σύστημα μέσω των αγγείων. Το νερό κινείται έπειτα μέσω των μεσόφυλλων κυττάρων προς την επιφάνεια εξάτμισης. Η διαρρύθμιση του αγγειακού συστήματος ποικίλλει στα διάφορα είδη φύλλων. Η νεύρωση του φύλλου χαρακτηρίζεται συνήθως ως δικτυωτή ή παράλληλη. Στα δικοτυλήδονα τα αγγεία διαμορφώνουν ένα σχέδιο διακλάδωσης με λεπτότερα αγγεία να αποκλίνουν καθώς διακλαδίζονται από τα παχύτερα όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 18. Στο σχέδιο (α) βλέπουμε τη νεύρωση σε ένα ώριμο φύλλο καπνού, όπου φαίνεται το κεντρικό νεύρο του φύλλου και τα αρχικά πλευρικά νεύρα, όσο και η διατομή του μεσόφυλλου και των πλευρικών νεύρων σε διάφορα μεγέθη. Ο εσωτερικός σύνθετος ιστός βρέθηκε μόνο στο κεντρικό νεύρο και τα αρχικά πλευρικά νεύρα. Δεξιά κάτω φαίνεται η μεγέθυνση ενός μικρού μέρους από φύλλο που φαίνεται το βασικό νευρικό δίκτυο.



Εικόνα 18. Μεγέθυνση της νεύρωσης σε ένα ώριμο φύλλο καπνού, όπου φαίνεται το βασικό νευρικό δίκτυο. (Water relations of plants, Paul J. Kramer, ACADEMIC PRESS INC 1983.)

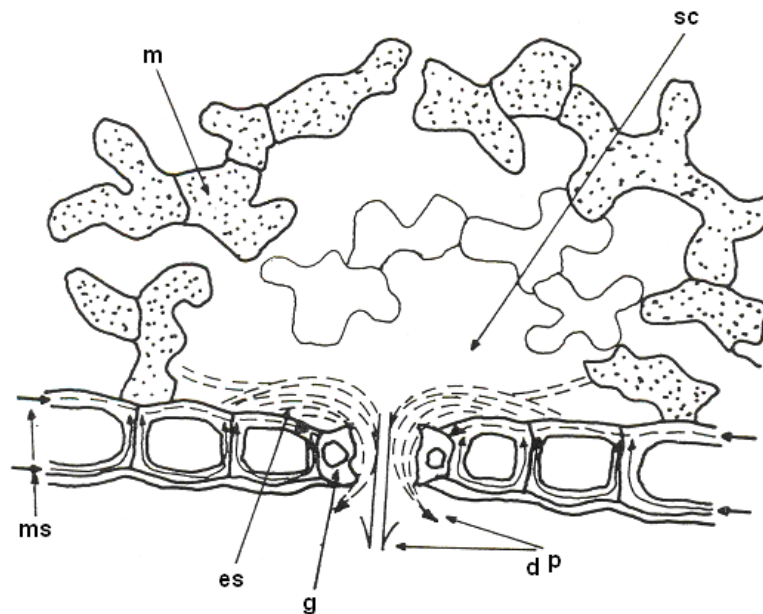
Η μετακίνηση του νερού έξω από το αγγειακό σύστημα εμφανίζεται σε δύο κατευθύνσεις, προς την επιδερμίδα και προς το μεσόφυλλο. Η μεταφορά στην επιδερμίδα πραγματοποιείται είτε σε υγρή φάση, κυρίως μέσω των επεκτάσεων των περιβληματικών δεσμών, είτε σε αέρια φάση μετά από την εξάτμιση στις υποστοματικές κοιλότητες. Η μεταφορά στο μεσόφυλλο εμφανίζεται σε υγρή φάση μέσω των κυτταρικών τοιχωμάτων και των μεσοκυττάρων διαστημάτων προς τις επιφάνειες εξάτμισης στις υποστοματικές κοιλότητες. Όπως και στο φλοιό της ρίζας, η μετακίνηση του νερού μέσω της διάβασης του αποπλάστη προσφέρει περίπου 50 φορές χαμηλότερη αντίσταση από την μετακίνηση μέσω των πρωτοπλαστών.

8.1 Κίνηση νερού σε φάση υδρατμού

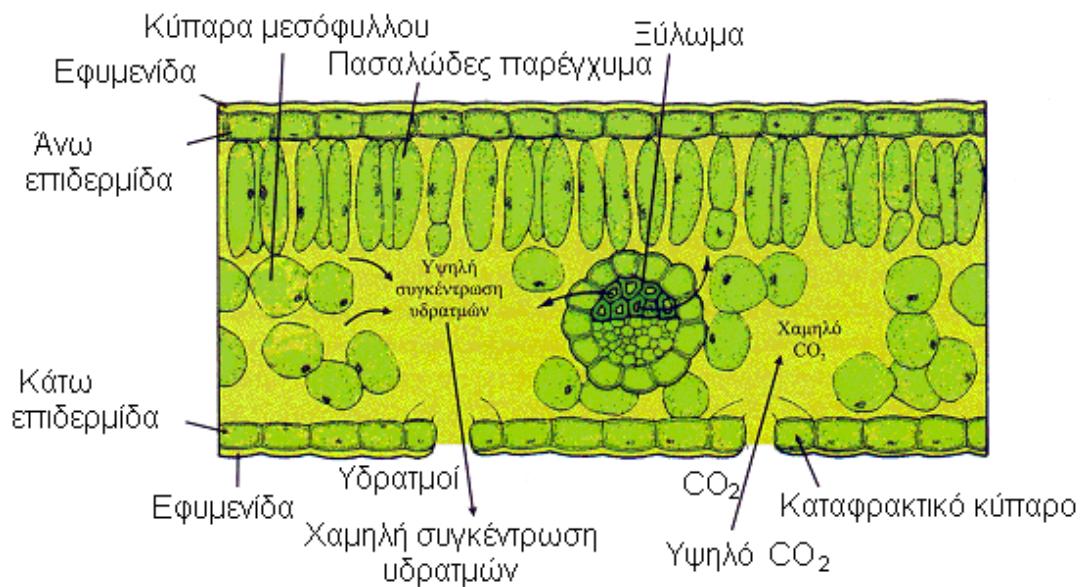
Η μετακίνηση του νερού σε φάση υδρατμού εμφανίζεται στο ακραίο τμήμα του συστήματος εδάφους-φυτών και αποτελεί τη φυσιολογική διαδικασία γνωστή ως διαπνοή. Η ισορροπία της ακτινοβολίας σε ένα φύλλο καθορίζει τη δυναμικότητα για το νερό όπου μετατρέπεται σε υδρατμό. Κατά συνέπεια οι ιδιότητες της ακτινοβολίας στην επιφάνειά ενός φύλλου διαδραματίζουν έναν ρόλο στο ποσοστό νερού που εξατμίζεται στο μεσόφυλλο.

Οι περιοχές εξάτμισης βρίσκονται στις υποστοματικές κοιλότητες και σε εξωτερικά κυτταρικά τοιχώματα στα επιδερμικά κύτταρα. Στην εικόνα 19 φαίνεται η ροή του υδρατμού μεταξύ των διάκενων αέρα του φύλλου και της εξωτερικής ατμόσφαιρας. Όπου το sc : υποστοματική κοιλότητα, m : μεσόφυλλα κύτταρα, es : κύριες περιοχές εξάτμισης, g : προστατευτικό κύτταρο, dp : εξωτερική διάβαση διάχυσης, ms : κύριο ρεύμα του υγρού νερού.

Επίσης στην εικόνα 20 φαίνονται οι αντίθετες κατεύθυνσης μετακινήσεις των υδρατμών και του CO_2 . Και στις δύο περιπτώσεις, οι παρεμβαλλόμενες αντιστάσεις είναι της ίδιας φύσης. Η εξάτμιση εμφανίζεται κυρίως σε εσωτερικό επιδερμικό τοίχωμα στο κοντινότερο στοματικό πόρο και όχι από τα τοιχώματα των μεσόφυλλων κυττάρων που ευθυγραμμίζουν με τις κοιλότητες. Αυτό γίνεται από την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας-υδρατμού που δημιουργείται σε αυτές τις περιοχές καθώς επίσης και από το εσωτερικό φελλώδες μεσόφυλλο κυτταρικό τοίχωμα.



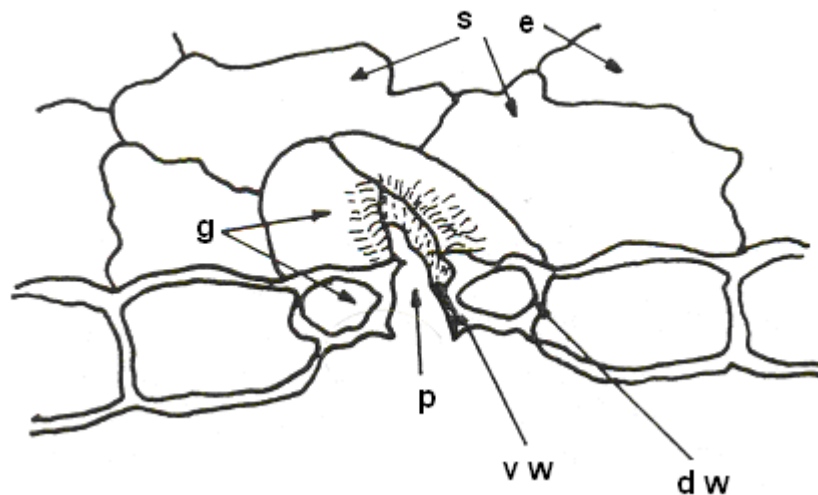
Εικόνα 19. Ροή υδρατμού μεταξύ των κενών αέρα του φύλλου και της εξωτερικής ατμόσφαιρας. (Water stress on plants, G. M. Simpson)



Εικόνα 20. Μετακίνηση υδρατμών και CO₂ σε αντίθετη κατεύθυνση. (Φυσιολογία φυτών από το μόριο στο περιβάλλον, Β. Γαλατς, Δ. Γανωτακς, Κ. Γκανη –Σπυροπούλου, Γ.Καραμπουρνιωτης, Κ. Κοτζαμπασης, Ι. Κωνσταντινιδου, Ι Μανετας, Κ. Ρουμπελακη-Αγγελακη Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης)

Η αντίσταση των στομάτων εξαρτάται από τον αριθμό των στομάτων ανά μονάδα επιφάνειας του φύλλου καθώς επίσης και από τη γεωμετρία των στοματικών πόρων. Οι μεταβολές στο άνοιγμα των στομάτων επιτυγχάνονται από τις αλλαγές σπαργής των προστατευτικών κυττάρων που ευθυγραμμίζουν το στοματικό πόρο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 21 παρουσιάζεται σε πλευρική τομή, τμήμα ενός νεφροειδούς στόματος όπου g: προστατευτικό κύτταρο, p: πόρος, s: θυγατρικά κύτταρα, e: επιδερμικό κύτταρο, vw: παχύ κοιλιακό τοίχωμα, και dw: λεπτό ραχιαίο τοίχωμα του προστατευτικού κυττάρου

Λόγω του μη ομοιόμορφου πάχους των τοιχωμάτων τα προστατευτικά κύτταρα κάμπτονται όσο η σπαργή αυξάνεται σε περιεκτικότητα νερού και αυτό οδηγεί στο άνοιγμα του πόρου.

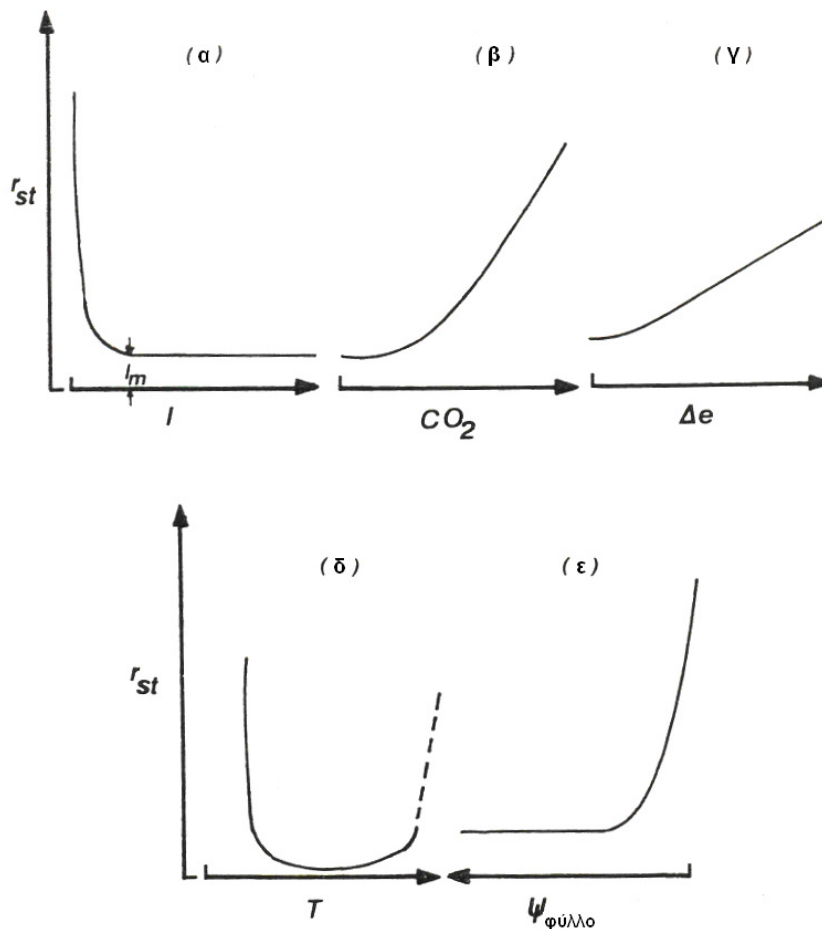


Εικόνα 21. Πλευρική τομή ενός νεφροειδούς στόματος σε φύλλο. (Water stress on plants)

Τα στόματα αποκρίνονται σε διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως το φως, τη σχετική υγρασία, τη συγκέντρωση του CO₂, τη θερμοκρασία, και το επίπεδο νερού των φύλλων.

Στην εικόνα 22 βλέπουμε τις αλλαγές στην αντίσταση των στομάτων (r_{st}) ως συνάρτηση των περιβαλλοντικών και φυτικών παραγόντων. Στην καμπύλη (α) ως προς την ένταση φωτός (I) όπου το I_m αντιπροσωπεύει την κορεσμένη ένταση. Η αντίσταση των στομάτων μειώνεται με την αυξανόμενη ένταση φωτός, που φθάνει σε ελάχιστη τιμή σε μια "κορεσμένη ένταση". Στην καμπύλη (β) ως προς την συγκέντρωση του CO₂, το r_{st} αυξάνεται με την αυξανόμενη περιβαλλοντική

συγκέντρωση του CO_2 , στην καμπύλη (γ) ως προς την διαφορά συγκέντρωσης υδρατμού μεταξύ μεσόφυλλου και της ατμόσφαιρας, (Δe), η αυξανόμενη ατμοσφαιρική ξηρότητα αυξάνει το r_{st} , στην καμπύλη (δ) το r_{st} μειώνεται με την αυξανόμενη θερμοκρασία (T) μέχρι μια βέλτιστη τιμή πέρα από την οποία τα στόματα αρχίζουν να κλείνουν και τέλος στην καμπύλη (ε) κατά το δυναμικό νερού φύλλου ($\Psi_{\text{φύλλου}}$) τα στόματα κλείνουν όταν φθάνουν τα φύλλα σε ένα κρίσιμο επίπεδο αφυδάτωσης. Αυτό επιτρέπει στα φυτά να αποφύγουν την ζημία της αποξήρανσης με την εξάλειψη των απωλειών νερού.



Εικόνα 22. Αλλαγές στην αντίσταση των στομάτων (r_{st}) ως συνάρτηση των περιβαλλοντικών και φυτικών παραγόντων. (Water stress on plants, G. M. Simpson)

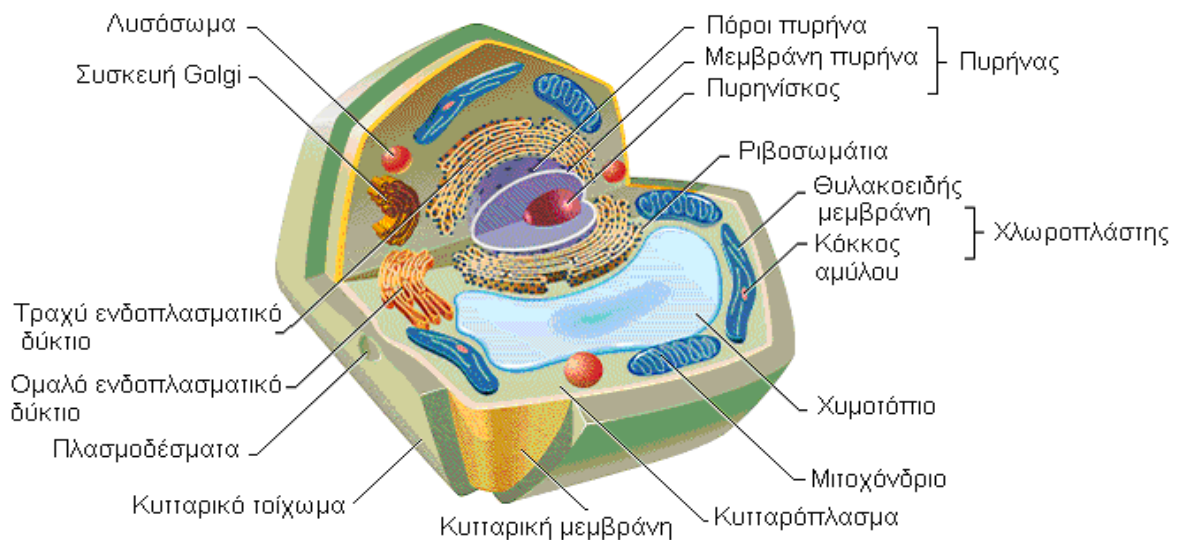
Από τους προαναφερθέντες παράγοντες, η συγκέντρωση του CO₂ θεωρείται ότι ασκεί τη σημαντικότερη επιρροή στις μετακινήσεις των στομάτων, ενώ το φως δεν είναι απαραίτητο για το άνοιγμα των στομάτων, ενώ εξασφαλίζει ότι το δυναμικό νερού των φύλλων είναι επάνω από μια τιμή κατώτατου ορίου. Εάν η αφυδάτωση συνεχίζεται και επιτυγχάνεται η κατώτατη οριακή τιμή, έπειτα τα στόματα κλείνουν ανεξάρτητα από τη συγκέντρωση του CO₂. Αυτός ο διακόπτης της απόκρισης προκαλείται πιθανά από τη συσσώρευση του αμπισισικού οξέος στα προστατευτικά κύτταρα, όπου είναι ένας ανασταλτικός παράγοντας και προκαλεί το άμεσο κλείσιμο των στομάτων. Με αυτόν τον τρόπο, τα στόματα λύνουν ένα δίλημμα της αντιτιθέμενων προτεραιοτήτων δηλαδή να παραμείνουν ανοικτά για μια περισσότερη αφομοίωση του CO₂ και συγχρόνως, να αποτρέψουν την υπερβολική απώλεια νερού μέσω της διαπνοής.

Υπάρχουν τεράστιες διαφορές μεταξύ των φυτών όσον αφορά την απόκριση των στομάτων στους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Μερικοί παράγοντες όπως η οριακή τιμή του δυναμικού νερού του φύλλου στην οποία το κλειστό στόμα έχει μεγάλη οικολογική σπουδαιότητα, δεδομένου ότι αυτή η τιμή καθορίζει το βαθμό αφυδάτωσης όπου τα φυτά μπορούν να αντέξουν προτού σταματήσουν την απώλεια νερού.

9. ΤΟ ΝΕΡΟ ΣΤΟ ΚΥΤΤΑΡΟ

Το νερό είναι το σημαντικότερο συστατικό των φυτών. Αποτελεί περίπου το 80 με 90% του καθαρού βάρους των περισσότερων οργάνων των ποωδών φυτών και πάνω από το 50% του καθαρού βάρους των ξύλινων μερών τους. Το νερό έχει επιπτώσεις, άμεσες ή έμμεσες, στις περισσότερες φυσιολογικές διαδικασίες στο φυτό. Εκτός από μερικά είδη φυτών, η αφυδάτωση των φυτικών ιστών κάτω από κάποιο κρίσιμο επίπεδο συνοδεύεται από αμετάκλητες αλλαγές στη δομή τους και τελικά από το μαρασμό των φυτών. Το νερό είναι ένα σημαντικό συστατικό του πρωτοπλάσματος, ενεργεί ως διαλύτης για πολλές στερεές και αεριώδεις ουσίες, διαμορφώνει μια συνεχή υγρή φάση σε όλο το φυτό ενώ συμμετέχει σε πολλές σημαντικές φυσιολογικές αντιδράσεις. Διατηρεί την σπαργή των κυττάρων, η οποία ασκεί έναν αντίκτυπο σε πολλές φυσιολογικές διαδικασίες.

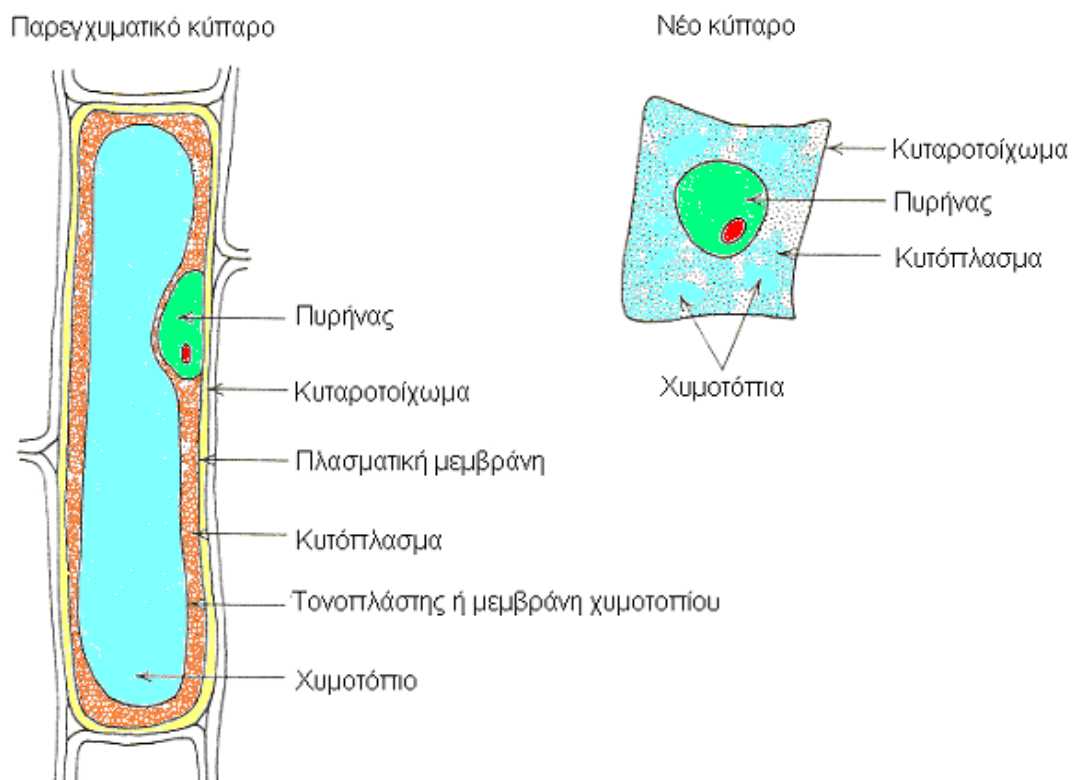
Το μεγαλύτερο μέρος του νερού στο φυτό εμφανίζεται στα κύτταρα, κυρίως στα χυμοτόπια. Τα κύτταρα των ώριμων φυτών χαρακτηρίζονται από σχετικά άκαμπτα κυτταρικά τοιχώματα και μεγάλα κεντρικά χυμοτόπια, όπου και τα δύο διαδραματίζουν σημαντικούς ρόλους στις σχέσεις νερού των κυττάρων όπως φαίνονται στην εικόνα 23.



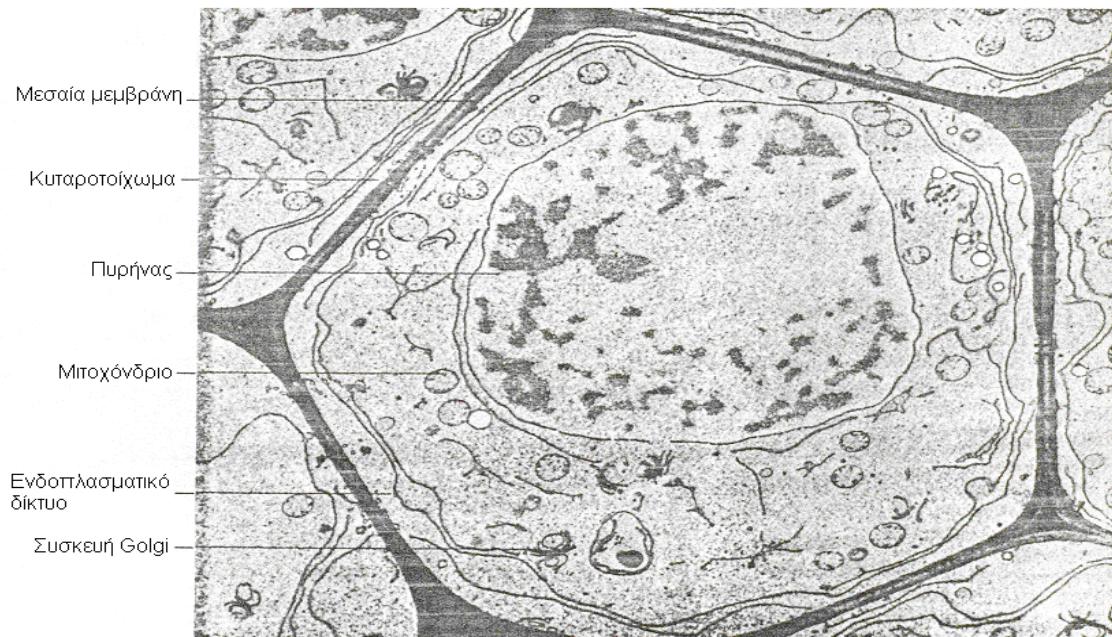
Εικόνα 23. Τρισδιάστατη εικόνα του εσωτερικού ενός φυτικού κύτταρου. (Φυσιολογία φυτών από το μόριο στο περιβάλλον, Β. Γαλατης, Δ. Γανωτακης, Κ. Γκανη –Σπυροπουλου, Γ.Καραμπουρνιωτης, Κ. Κοτζαμπασης, Ι. Κωνσταντινιδου, Ι Μανετας, Κ. Ρουμπελακη-Αγγελακη Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης)

Ένα χαρακτηριστικό παρεγχυματικό κύτταρο όπου διαμορφώνει το μεγαλύτερο μέρος του ιστού για την αποθήκευση νερού στα φυτά παρουσιάζεται στην εικόνα 24. Το στρώμα του κυτταροπλάσματος στα ώριμα κύτταρα είναι συνήθως περισσότερο αδύνατο από ότι φαίνεται στην εικόνα.

Σε αντίθεση με το νέο κύτταρο, το ώριμο κύτταρο αποτελείται από ένα τοίχωμα που εσωκλείει ένα λεπτό στρώμα του κυτταροπλάσματος όπου, στη συνέχεια, εσωκλείει ένα μεγάλο κεντρικό χυμοτόπιο. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο έχει δώσει πολλές πρόσθετες πληροφορίες σχετικά με τις λεπτομέρειες της δομής των κυττάρων. Μια ηλεκτρονική μεγέθυνση ενός φυτικού κυττάρου παρουσιάζεται στην εικόνα 25.



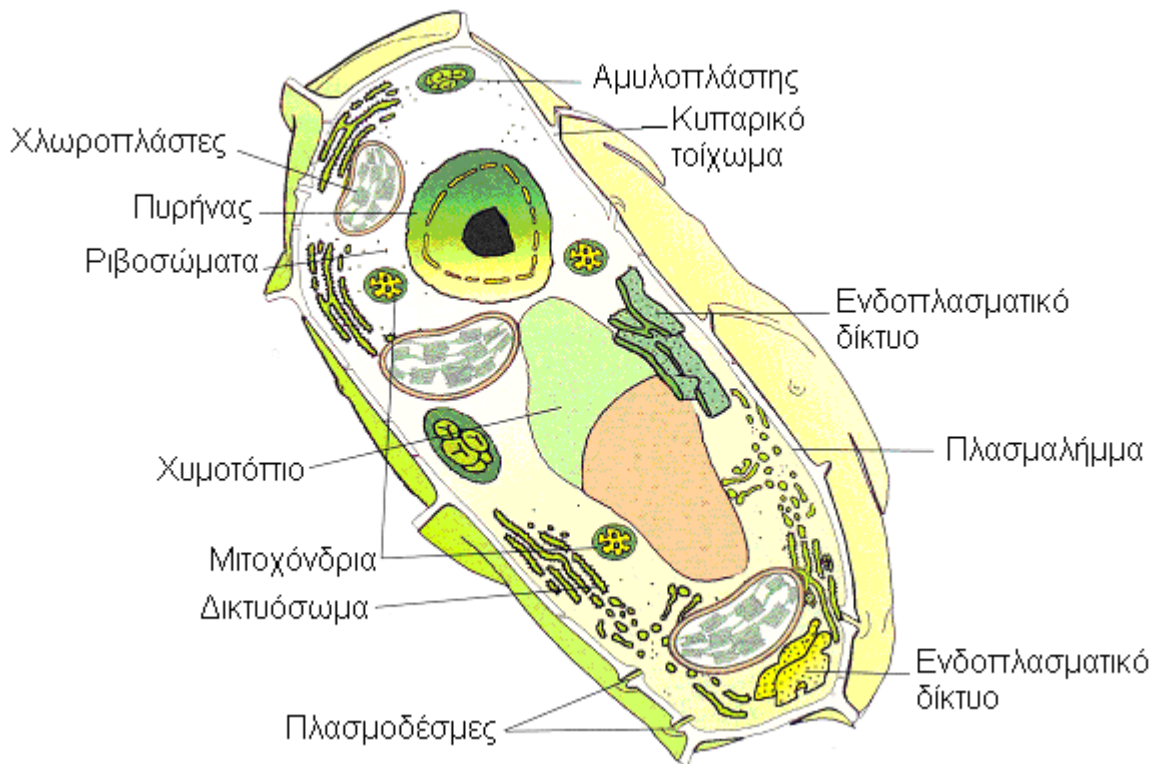
Εικόνα 24. Σχεδιάγραμμα ενός μεριστηματικού κύτταρου και ενός ώριμου χυμοτοπίου παρεγχυματικού κυττάρου. (Water relations of plants, Paul J. Kramer, academic press inc 1983)



Εικόνα 25. Ηλεκτρονική μεγέθυνση ενός νεαρού φυτικού κυττάρου όπου φαίνονται οι αρχικές του δομές. (Water relations of plants, Paul J. Kramer, academic press inc 1983)

9.1 Δομή του φυτικού κυττάρου

Το φυτικό κύτταρο αποτελείται από διάφορα τμήματα. Τα κυριότερα μέρη ενός φυτικού κυττάρου κατά την κίνηση του νερού μέσα στο φυτό είναι τα το κυτταρικό τοίχωμα, το κυτταρόπλασμα και τα χυμοτόπια όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 26.



Εικόνα 26. Διάγραμμα φυτικού κυττάρου (Φυσιολογία φυτών από το μόριο στο περιβάλλον, Β. Γαλατης, Δ. Γανωτακης , Κ. Γκανη –Σπυροπούλου, Γ.Καραμπουρνιωτης, Κ. Κοτζαμπασης, Ι. Κωνσταντινιδου, Ι Μανετας, Κ. Ρουμπελακη-Αγγελακη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης)

9.1.1 Κυτταρικό τοίχωμα

Το σημαντικό χαρακτηριστικό των σπορόφυτων είναι η ύπαρξη ισχυρών κυτταρικών τοιχωμάτων όπου με τη μεγάλη ελαστική δύναμη περιορίζουν την επέκταση του πρωτοπλάστη, με συνέπεια την ανάπτυξη μιας πίεσης σπαργής. Κατά συνέπεια, ο ιστός που αποτελείται από στομφώδη κύτταρα έχει ιδιαίτερη μηχανική

δύναμη, και η σπαργή των κυττάρων είναι αρμόδια για τη συντήρηση δομικών μορφών όπως οι νέοι πλώδη μίσχοι και τα φύλλα, τα άνθη, και τα αυξανόμενα ακρορίζα. Το πλαίσιο των κυτταρικών τοιχωμάτων αποτελείται από στρώματα μικρόνιης κυτταρίνης όπου αποτελείται από εκατοντάδες μόρια κυτταρίνης για να διατηρούν τη συνοχή τους από δεσμούς υδρογόνου. Στη φάση αυτή, πάνω από το μισό του όγκου του τοιχώματος αποτελείται από νερό, και μπορεί να εμφανιστεί πλαστική και ελαστική διεύρυνση των κυττάρων.

Κατά συνέπεια, η αύξηση των κυττάρων φαίνεται να εξαρτάται από δύο σύνολα παραγόντων. Τους βιοχημικούς παράγοντες που ελέγχουν την εναπόθεση των συστατικών και την εκτασιμότητα των κυτταρικών τοιχωμάτων, και τους παράγοντες που ελέγχουν την εσωτερική διάχυση του νερού όπου παράγει την πίεση σπαργής όταν απαιτείται.

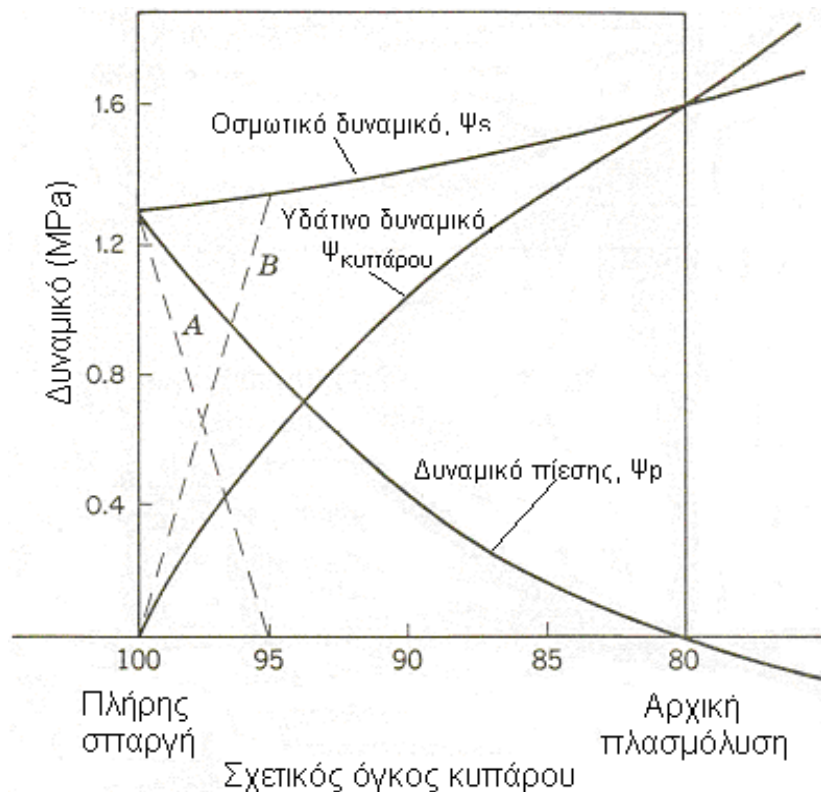
Πολλά ώριμα κυτταρικά τοιχώματα διατηρούν αρκετή ελαστικότητα ώστε να υποβληθούν σε αλλαγές στον όγκο τους με την αλλαγή στην σπαργή, όπως υποδεικνύεται σχηματικά στην εικόνα 27. Υπολογίσιμες μειώσεις στο φύλλο και τον όγκο των μίσχων παρατηρείται συχνά κατά τη διάρκεια του μαρασμού των φυτών.

Τα κυτταρικά τοιχώματα διαπερνιούνται επίσης από στοιχεία κυτταροπλάσματος και πλασμοδέσμες τα οποία συνδέουν τους πρωτοπλάστες των παρακείμενων κυττάρων για να διαμορφώσουν ένα συνεχές σύστημα του κυτταροπλάσματος, όπου λέγεται συμπλάστης.

Δύο ιδιότητες των κυτταρικών τοιχωμάτων είναι σημαντικές στις σχέσεις νερού των φυτών. Πρώτον είναι το ποσοστό νερού που εμφανίζεται στο τοίχωμα και δεύτερον ο βαθμός ελαστικότητας. Ο όγκος του νερού που εμφανίζεται στα κυτταρικά τοιχώματα είναι σημαντικός όσον αφορά τον πιθανό ρόλο του τοιχώματος, ως διάβαση για το νερό και την μετακίνηση της διαλυτής ουσίας έξω από το ξύλημα, ειδικά στις ρίζες και τα φύλλα. Επίσης έχει προταθεί ότι το νερό των κυτταρικών τοιχωμάτων συμβάλλει στην αντοχή κατά της ξηρασίας και προκαλεί σφάλματα στη μέτρηση του δυναμικού νερού των κυττάρων από το διάλυμα του σφρίγγους του χυμοτοπίου. Η ελαστικότητα του κυτταρικού τοιχώματος είναι σημαντική επειδή έχει επιπτώσεις στη σχέση μεταξύ του όγκου των κυττάρων και του περιεχόμενου νερού, της πίεσης σπαργής, και το δυναμικό νερού, όπως φαίνεται στην εικόνα 27.

Οι συνεχής γραμμές αντιπροσωπεύουν ένα κύτταρο με εκτεταμένα τα ελαστικά τοιχώματα. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν ένα κύτταρο ελαφρώς εκτεταμένο με άκαμπτα κυτταρικά τοιχώματα, όπου η γραμμή Α

αντιπροσωπεύει το δυναμικό πίεσης και η γραμμή B το δυναμικό νερού των κυττάρων. Το νερό και τα οσμωτικά δυναμικά είναι αρνητικά. Το δυναμικό πίεσης είναι θετικό αλλά μειώνεται σε μηδέν όταν το δυναμικό νερού πέφτει τόσο χαμηλά όσο το οσμωτικό δυναμικό. Σημειώνεται ότι υπάρχει μια πολύ μεγαλύτερη μείωση στο δυναμικό πίεσης και στο δυναμικό του νερού για μια δεδομένη αλλαγή στον όγκο των κυττάρων και την περιεκτικότητά τους σε νερό για τα κύτταρα με άκαμπτα κυτταρικά τοιχώματα απ'ό,τι για τα κύτταρα με ελαστικά κυτταρικά τοιχώματα. Το διάγραμμα είναι γνωστό ως διάγραμμα Hoffer και προσαρμόζεται από διάφορες πηγές. Οι αριθμοί είναι βασισμένοι σε πραγματικά δεδομένα.



Εικόνα 27. Αλληλεξαρτήσεις μεταξύ του όγκου των κυττάρων, του οσμωτικού δυναμικού, της πίεσης σπαργής, και του δυναμικού νερού των κυττάρων. (Water relations of plants)

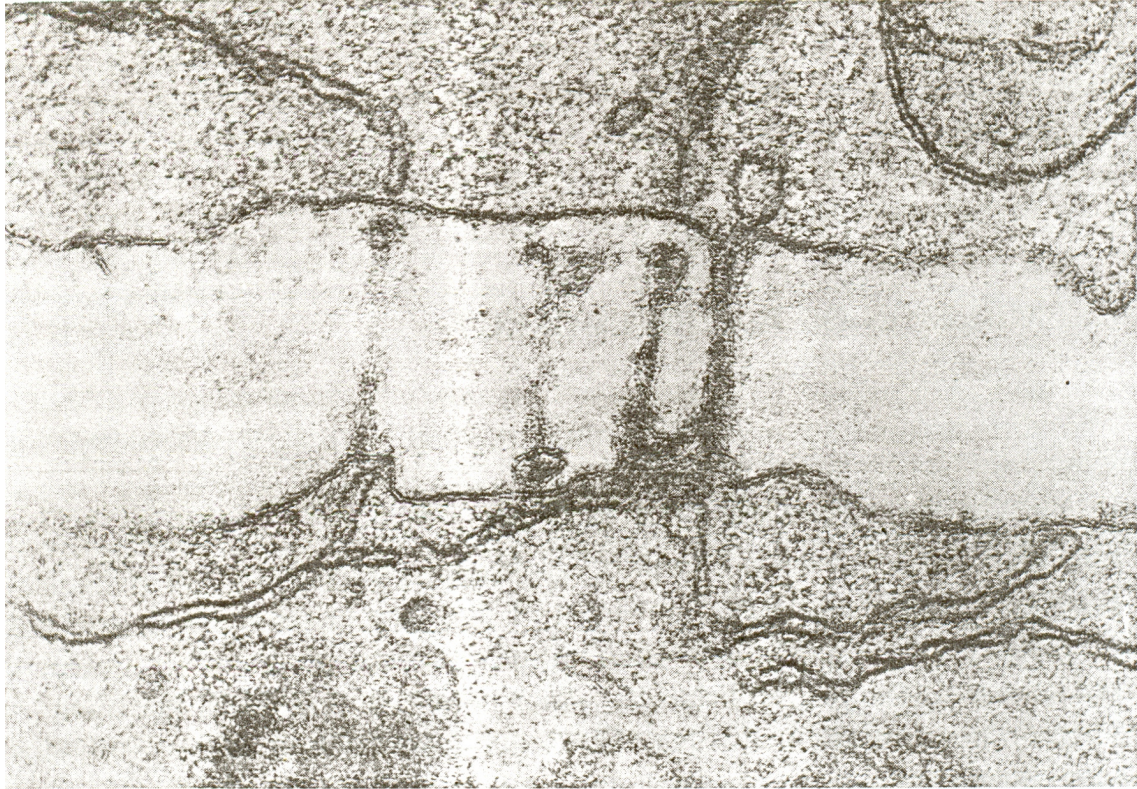
Τα κύτταρα με τα άκαμπτα τοιχώματα έχουν έναν υψηλό συντελεστή ελαστικότητας και υποβάλλονται σε μια μικρότερη μείωση στον όγκο και την περιεκτικότητά τους σε νερό, για μια δεδομένη μείωση στο δυναμικό νερού, από ότι στα κύτταρα με ελαστικά τοιχώματα. Αυτό είναι επειδή η πίεση των τοιχωμάτων στον πρωτοπλάστη μειώνεται γρηγορότερα και η πλάσμολυση εμφανίζεται πιο σύντομα με την απώλεια του νερού στα κύτταρα με άκαμπτα τοιχώματα απ' ό,τι στα κύτταρα με ελαστικά τοιχώματα όπου στενεύουν καθώς το νερό χάνεται.

9.1.2 Κυτταρόπλασμα

Μέσα στο κυτταρικό τοίχωμα, υπάρχει ένα στρώμα κυτταροπλάσματος που ποικίλλει από ένα ημίρρευστο κολλοειδές διάλυμα έως ένα πήκτωμα. Περικλείεται στην εξωτερική επιφάνεια του από τη μεμβράνη πλάσματος ή το πλασμάλημμα, και στην εσωτερική επιφάνεια από τη μεμβράνη χυμοτοπίου ή τονοπλάστη. Δεν περιέχει μόνο έναν πυρήνα και πλαστίδια αλλά και άλλα διάφορα κυτταρικά όργανα, συμπεριλαμβανομένων των μιτοχονδρίων, ριβοσωμάτια, μικροσωμάτια, δικτυοσωμάτια, συσκευές Golgi και ενδοπλασματικό δίκτυο όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 25.

Το σημαντικότερο γεγονός είναι ότι το κυτταρόπλασμα περιέχει αξιοσημείωτο νερό που δεσμεύεται στο πρωτεϊνικό πλαίσιο του. Εξάλλου οι περιοριστικές μεμβράνες του είναι διαπερατές και ελέγχουν την είσοδο και την έξοδο των διαλυτών ουσιών. Η μεμβράνη χυμοτοπίου εμφανίζεται να είναι μηχανικά ισχυρότερη από τη μεμβράνη πλάσματος και έχει πιθανώς περισσότερη περιεκτικότητα σε λιπίδια. Διατηρεί την διαφορετική διαπερατότητά του για κάποιο χρονικό διάστημα μετά από τον χωρισμό από το κυτταρόπλασμα, ενώ η διαφορετική διαπερατότητα της μεμβράνης πλάσματος χάνεται αμέσως τον χωρισμό από το κυτταρόπλασμα.

Οι πλασμοδέσμες είναι λεπτοί σωλήνες του κυτταροπλάσματος με διάμετρο 0,2 μm, που επεκτείνονται μέσω των κυτταρικών τοιχωμάτων και συνδέουν τους πρωτοπλάστες των παρακείμενων κυττάρων όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 28. Κατά συνέπεια, μετατρέπουν ένα σύνολο κυττάρων σε έναν οργανωμένο ιστό, το συμπλάστη, στον οποίο οι διαλυτές ουσίες μπορούν να κινηθούν σε ιδιαίτερες αποστάσεις χωρίς να διασχίσουν διαφορετικά τις διαπερατές μεμβράνες.



Εικόνα 28. Μεγέθυνση από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο κυτταρικού τοιχώματος μιας ρίζας κρεμμυδιού όπου παρουσιάζει τις πλασμοδέσμες, την μεμβράνη πλάσματος σε κάθε πλευρά του κυτταρικού τοιχώματος και μέρη του ενδοπλασματικού δικτύου. (Water relations of plants, Paul J. Kramer, Academic Press inc 1983)

9.1.3 Χυμοτόπια

Τα χυμοτόπια κυμαίνονται σε μέγεθος από μικροσκοπικές σφαιρικές ή διαμορφωμένες σε ράβδους δομές όπου είναι χαρακτηριστικό του μεριστεματικού ιστού στα μεγάλα κεντρικά χυμοτόπια από ώριμα παρεγχύματα κύτταρων όπου καταλαμβάνουν περισσότερο από το 50% του όγκου των κυττάρων. Το μέγεθος και η μορφή τους μπορούν να αλλάξουν, τα μικρά χυμοτόπια συγχωνεύονται για να διαμορφώσουν μεγαλύτερα και τα μεγάλα χωρίζονται μερικές φορές για να διαμορφώσουν μικρότερα. Τα χυμοτόπια περιέχουν αξιοσημείωτα ποσά σακχάρων και αλάτων που αποτελούν κατά ένα μεγάλο μέρος το οσμωτικό δυναμικό του σφρίγγους των κυττάρων. Μπορούν επίσης να περιέχουν μια ευρεία ποικιλία άλλων ουσιών, συμπεριλαμβανομένων των αμινοξέων, αμιδίων, πρωτεϊνών, λιπιδίων, κολλοειδών, τανινών, ανθοκυανών και άλλων χρωστικών ουσιών. Ακόμα

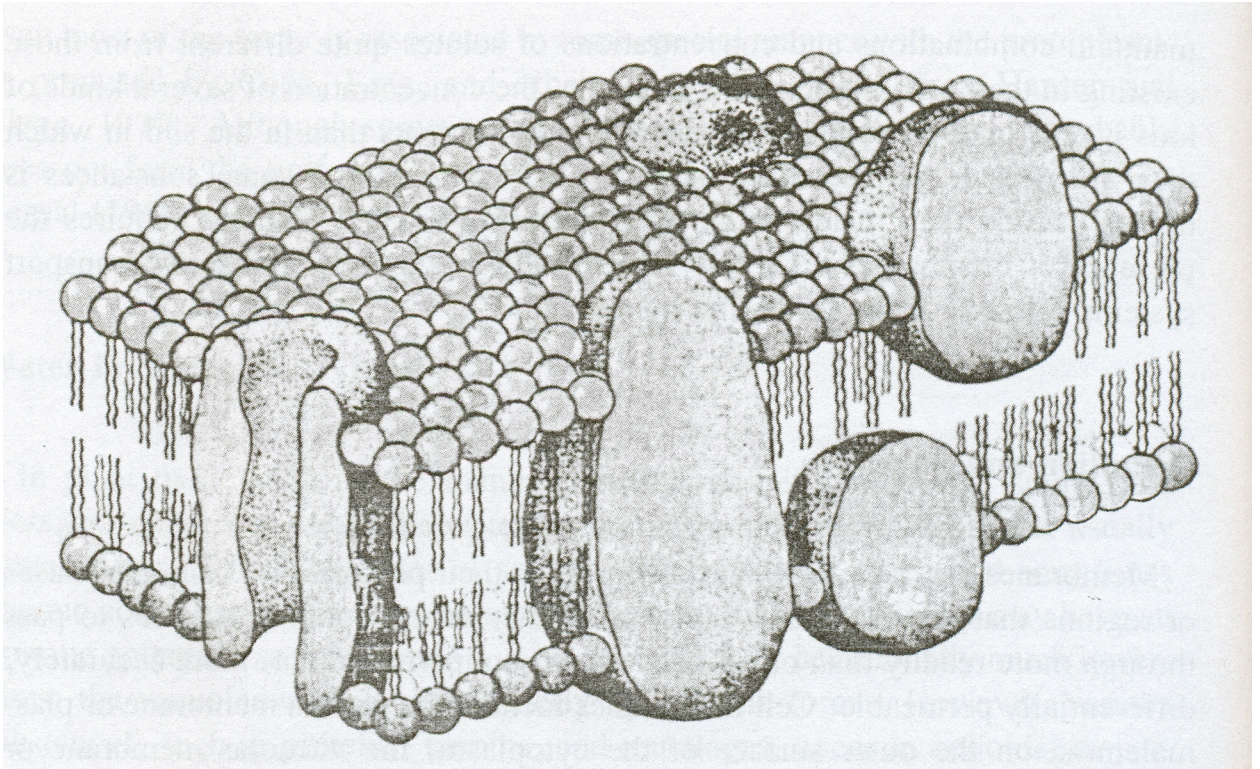
οποιαδήποτε μεταβολική δραστηριότητα εμφανίζεται στα χυμοτόπια ελέγχεται από το κυτόπλασμα.

Τα μεγάλα κεντρικά χυμοτόπια είναι πλεονέκτημα επειδή είναι δύσκολο για τα φυτά να παραχθεί αρκετή πρωτεΐνη έτσι ώστε να γεμίσει τα κύτταρά τους με πρωτόπλασμα. Τα χυμοτόπια διαδραματίζουν επίσης ουσιαστικό ρόλο στην ανάπτυξη της πίεσης σπαργής, που είναι απαραίτητη για να διατηρήσει την δομή των ποωδών φυτών όπως οι νέοι μίσχοι, τα φύλλα, και τα άνθη.

9.1.4 Μembrάνες των κυττάρων

Οι μεμβράνες είναι περιοριστικά στρώματα που διαφέρουν στη διαπερατότητά τους από τις φάσεις ή τις περιοχές όπου χωρίζονται. Οι μεμβράνες που επιτρέπουν σε μερικές ουσίες να περάσουν μέσω αυτών ευκολότερα από κάποιες άλλες καλούνται ημιδιαπερατές. Οι μεμβράνες των κυττάρων περιλαμβάνουν τη μεμβράνη πλάσματος ή το πλασμαλλήμα στην εξωτερική επιφάνεια του κυτοπλάσματος, τη μεμβράνη χυμοτοπίου ή τονοπλάστη στην εσωτερική επιφάνεια του κυτταροπλάσματος οριοθετώντας έτσι το κεντρικό χυμοτόπιο.

Οι μεμβράνες εσωκλείουν τα κυτταρικά όργανα όπως ο πυρήνας, τα πλαστίδια, τα μιτοχόνδρια, και το σύνθετο σύστημα των μεμβρανών που επεκτείνεται σε όλο το κυτόπλασμα και λέγεται ενδοπλασματικό δίκτυο. Εξάλλου στο ρόλο τους ως διαπερατά στρώματα, οι μεμβράνες περιέχουν τα ένζυμα που περιλαμβάνονται σε πολλές σημαντικές βιοχημικές αντιδράσεις. Μια ηλεκτρονική μεγέθυνση της επιφάνειας των μεμβρανών παρουσιάζεται στην εικόνα 29. Ένα πρότυπο μιας κυτταρικής μεμβράνης, αποτελείται από ένα διπλό στρώμα των φωσφολιπιδίων με τα πρωτεϊνικά ενσωματωμένα μόρια σε αυτό. Οι πρωτεΐνες είναι πραγματικά συσπειρωμένες σε πολυπεπτικές αλυσίδες και είναι πιο σύνθετη η δομή από ότι παρουσιάζεται στο διάγραμμα. Ελέγχουν πιθανώς τη μετάβαση των ουσιών μέσω των μεμβρανών.



Εικόνα 29. Διάγραμμα ενός ρευστού μωσαϊκού προτύπου μιας μεμβράνης κυττάρων, που αποτελείται από ένα διπλό στρώμα των φωσφολιπιδίων με τα πρωτεϊνικά μόρια. (Water relations of plants, Paul J. Kramer, Academic Press inc 1983)

Τα πρωτεϊνικά μόρια που επεκτείνονται μέσω των μεμβρανών παρέχουν πιθανώς τις περιοχές ή τις διαβάσεις για τη μετακίνηση των υδρόφιλων ουσιών μέσω του στρώματος λιπιδίων από την ενεργή μεταφορά. Έχει προταθεί ότι πολλές από τις διαφορές στη διαπερατότητα των μεμβρανών εξαρτώνται από την γενετικά ελεγχόμενη σύνθεση των πρωτεϊνών των μεμβρανών.

Επί πρόσθετα στις σύνθετες προπλασματικές μεμβράνες τους, τα φυτά κατέχουν πολυκυτταρικές δομές όπως την επιδερμίδα και την ενδοδερμίδα που λειτουργούν κατά κάποιον τρόπο ως μεμβράνες. Δηλαδή οι ενδοδερμίδες φαίνονται να λειτουργούν ως εμπόδιο των ιόντων στις ρίζες. Τα φυτικά όργανα κατέχουν επίσης τα σχετικά στεγανά στρώματα όπως την επιδερμίδα στα φύλλα και τους καρπούς, διάφορα εξειδικευμένα επιστρώματα σπόρου και φλοιούς στους ξυλώδεις μίσχους και τις ρίζες, όπου διαδραματίζουν σημαντικούς ρόλους στον περιορισμό της λήψης και της απώλειας του νερού.

9.2 Κίνηση του νερού στα φυτικά κύτταρα

Το νερό είναι συνεχές μέσα στα φυτά, μέσω των κυτταρικών τοιχωμάτων, του πρωτοπλάσματος, και των διάφορων κυτταρικών οργάνων του, αλλά χωρίζεται σε μέρη όσον αφορά τις διαλυτές ουσίες από διαφορετικές διαπερατές μεμβράνες των πρωτόπλαστων και των κυτταρικών οργάνων τους. Μερικό νερό είναι δεσμευμένο στις επιφάνειες των κυττάρων και μερικό κρατείται στα μικροτριχοειδή των τοιχωμάτων, αλλά το μεγαλύτερο μέρος του νερού είναι ελεύθερο να κινηθεί κατά μήκος της μεταβολής της διαφοράς δυναμικού του νερού. Κατά περιόδους όταν η διαπνοή είναι αμελητέα, μπορεί να υπάρξει μια προσωρινή ισορροπία στο δυναμικό του νερού σε κάθε σημείο του φυτού, αλλά μια αλλαγή στη συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών ή η απώλεια νερού από τον ιστό έχει ως αποτέλεσμα την μετακίνηση νερού που συνεχίζεται έως ότου υπάρξει μια νέα ισορροπία.

Το νερό στα φυτά υπάρχει σε δύο συστήματα, στο νερό του αποπλάστη που εμφανίζεται στα κυτταρικά τοιχώματα και τα στοιχεία ξυλημάτων και το νερό του συμπλάστη που εμφανίζεται στους πρωτοπλάστες. Ο όγκος νερού του αποπλάστη είναι περίπου ισοδύναμος με το φαινομενικά ελεύθερο διάστημα. Αυτό είναι το μέρος ενός κυττάρου ή ενός ιστού στο οποίο οι διαλυτές ουσίες μπορούν να κινηθούν ελεύθερα από την διάχυση και συσσωρεύονται σε αξιόλογες συγκεντρώσεις από την ενεργό μεταφορά του νερού του συμπλάστη προς την μεμβράνη πλάσματος. Κατά συνέπεια, η διάκριση μεταξύ του νερού αποπλάστη και συμπλάστη αναφέρεται στην πραγματική διανομή των διαλυτών ουσιών, επειδή το ίδιο το νερό διαμορφώνει ένα συνεχές σύστημα.

9.2.1 Νερό στο κυτταρικό τοίχωμα

Το 5-40% του νερού σε ένα κύτταρο εμφανίζεται στα κυτταρικά τοιχώματα, όπου εξαρτιέται από την ηλικία, το πάχος, και τη σύνθεση των κυτταρικών τοιχωμάτων. Στα νέα κύτταρα και σε μερικούς ώριμους παρεγχυματικούς ιστούς τα τοιχώματα είναι λεπτά, όπου πάνω από το 50% του όγκου των τοιχωμάτων είναι νερό, αλλά αποτελεί μόνο ένα μικρό ποσοστό του συνολικού νερού των κυττάρων. Το νερό κρατείται στα τοιχώματα από τις μητρικές δυνάμεις, συμπεριλαμβανομένου των δεσμών υδρογόνου με τα διάφορα συστατικά των κυτταρικών τοιχωμάτων και

στα μικροσκοπικά τριχοειδή μεταξύ των ινών. Αυτό το μητρικό νερό καλείται μερικές φορές ως απορροφούμενο νερό.

Περισσότερο από μισό του όγκου μερικών κυτταρικών τοιχωμάτων καταλαμβάνεται από νερό και μερικοί τύποι κυτταρικών τοιχωμάτων στενεύουν τουλάχιστον στο 50% όταν αφυδατώνονται. Κατά την ωρίμανση των κυτταρικών τοιχωμάτων και της δευτεροβάθμιας πυκνότητας τους, η απόθεση λιγνίνης, φελλού, και άλλων ουσιών μειώνει συχνά τον διαθέσιμο όγκο για την αποθήκευση και τη μετακίνηση του νερού και τροποποιεί την διαπερατότητα.

9.2.2 Νερό στο κυτταρόπλασμα

Στον μεριστηματικό ιστό όπου ο όγκος χυμοτοπίου είναι μικρός και τα κυτταρικά τοιχώματα είναι λεπτά, το μεγαλύτερο μέρος του νερού εμφανίζεται στο κυτταρόπλασμα. Εντούτοις, στα ώριμα κύτταρα το κυτταρόπλασμα διαμορφώνει συνήθως μόνο ένα λεπτό στρώμα όπου ευθυγραμμίζει το κυτταρικό τοίχωμα και μπορεί να περιέχει τουλάχιστον 5 με 10% του νερού στο κύτταρο. Μέρος από αυτό το νερό είναι δεσμοί υδρογόνου με αλυσίδες πρωτεϊνών όπου διαμορφώνουν την δομή του πρωτοπλάσματος. Το νερό στο κυτταρόπλασμα είναι πολύ σημαντικό επειδή οι αλλαγές στην περιεκτικότητα σε νερό μπορούν να έχουν επιπτώσεις στην δομή των πρωτεϊνών. Εντούτοις, αυτό δεν σημαίνει ότι ολόκληρο ή ακόμα και το μεγαλύτερο μέρος του νερού συνδέεται με κάποιον ειδικό τρόπο με το πρωτόπλασμα.

9.2.3 Νερό στα χυμοτόπια

Στο φυτικό ιστό των ώριμων παρεγχυματικών κυττάρων σε φύλλα, μίσχους και ρίζες, το 50-80% ή περισσότερο του νερού εμφανίζεται στα χυμοτόπια. Αυτό το νερό περιέχει συνήθως υπολογίσιμα ποσά διαλυτών ουσιών, κυρίως σάκχαρα, άλατα, και μερικές φορές οργανικά οξέα και χρωστικές ουσίες όπως η ανθοκυάνη. Το σφρίγος χυμοτοπίου μπορεί να έχει ένα οσμωτικό δυναμικό που κυμαίνεται από -1.0 έως -3.0 MPa, ή και χαμηλότερα.

Κατά συνέπεια, το νερό χυμοτοπίου κρατιέται κυρίως από τις οσμωτικές δυνάμεις. Εντούτοις, διάφορες ουσίες, όπως οι πρωτεΐνες, τανίνες και κολλώδεις ουσίες, εμφανίζονται στην κολλοειδή διασπορά, όπου δεσμεύεται μερική ποσότητα νερού και συχνά κάνει το ιξώδες του σφρίγγους χυμοτοπίου διπλάσιο από του νερού. Τα χυμοτόπια ως οσμωτικά συστήματα παράγουν την πίεση σπαργής που είναι σημαντική για τη διεύρυνση κυττάρων και τη συντήρηση της μορφής στους ποώδεις ιστούς.

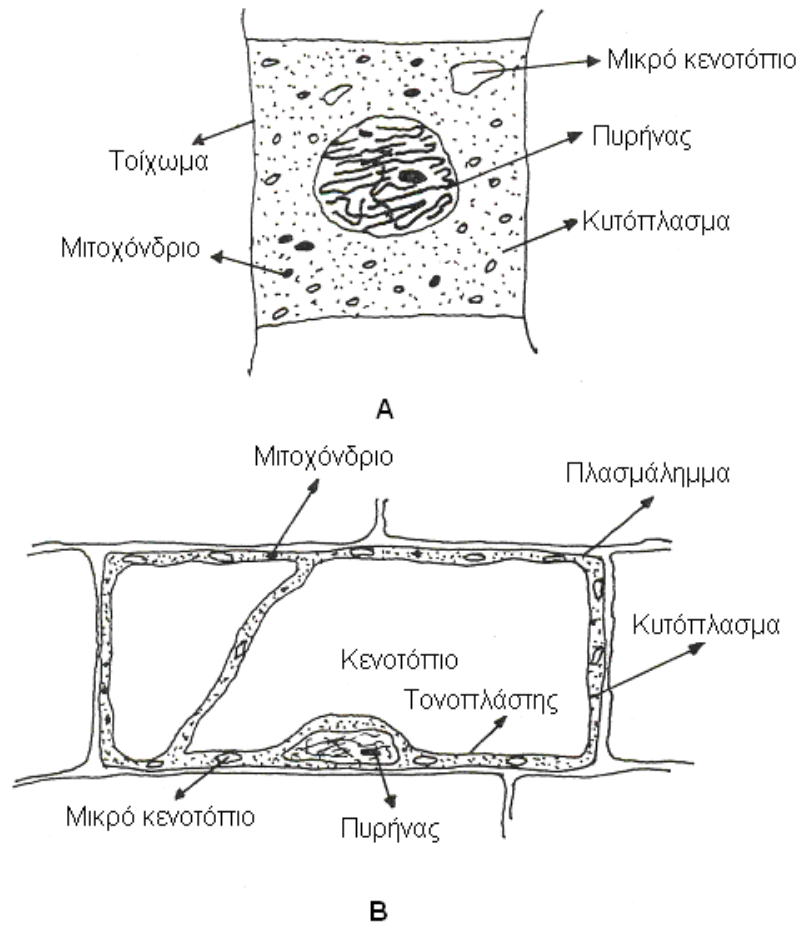
Το ποσοστό του συνολικού νερού των κυττάρων που εμφανίζεται στο συμπλάστη, κυρίως στα χυμοτόπια, εξαρτάται εν μέρει από τη χρησιμοποιημένη μέθοδο που το υπολογίζει, αλλά ακόμη περισσότερο από τον τύπο του ιστού. Προσδιορίζεται ότι με τη μέθοδο της πίεσης όγκου το 74-98% του νερού των φύλλων από διάφορα είδη δέντρων συμβάλλει στον οσμωτικό όγκο. Ο όγκος του 98% στον ώριμο ιστό φαίνεται πιθανώς υψηλός επειδή τα παχύτερα τοιχώματα του παλαιότερου ιστού είναι πιθανό να περιέχουν περισσότερο νερό.

10. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΦΥΤΟ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ

10.1 Το επίπεδο νερού στα φυτά

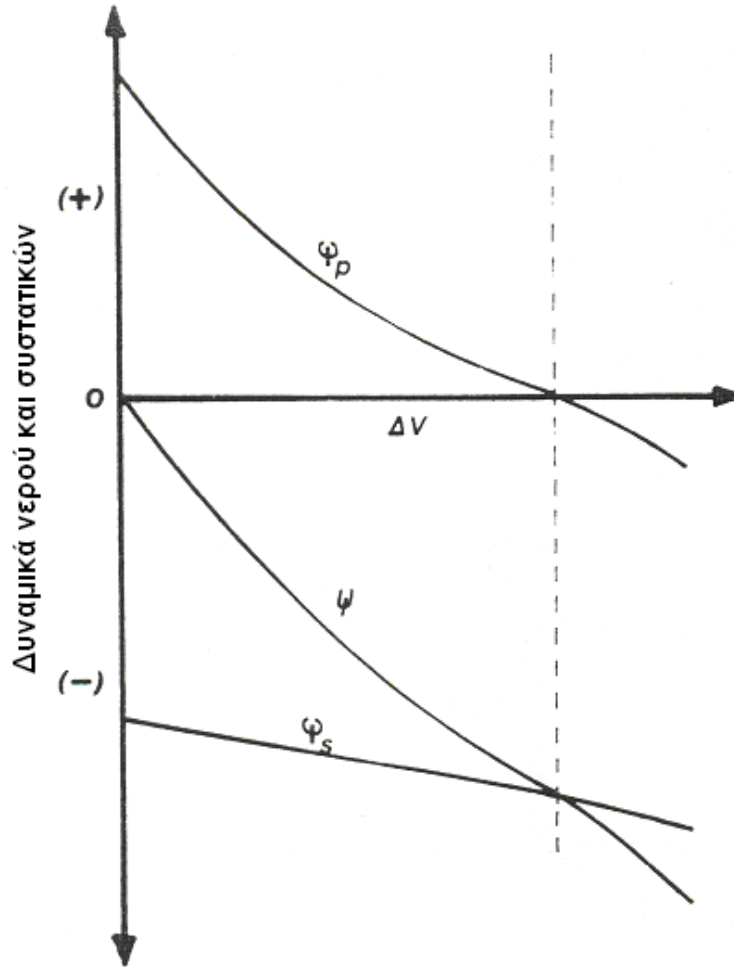
Η συμβολή των συνιστωσών δυναμικών στα κύτταρα των φυτών, όπως σε ένα μεριστηματικό και ένα ώριμο παρεγχυματικό κύτταρο από τα υψηλότερα φυτά παρουσιάζεται στην εικόνα 30. Το μεγάλο κενοτόπιο του ώριμου κυττάρου ελέγχει τις ανταλλαγές του νερού με ένα τρόπο κοντά σε ένα ιδανικό οσμόμετρο. Το ίδιο δεν ισχύει για το μεριστηματικό κύτταρο, όπου το χυμοτόπιο είναι μικρό ή αμελητέο.

Το κύτταρο αποτελείται από τρία ευδιάκριτα μέρη: ένα ελαστικό κυτταρικό τοίχωμα, το κυτόπλασμα με τον πυρήνα και τα όργανα του, και το κεντρικό κενοτόπιο που περιέχει ένα αραιό διάλυμα σακχάρων, ιόντων, οργανικών οξέων, κ.λπ. Το κενοτόπιο καταλαμβάνει περίπου το 80 με 90% του συνολικού όγκου ενός τέτοιου κυττάρου και περιβάλλεται από τον τονοπλάστη, μια ημιδιαπερατή μεμβράνη. Είναι επομένως λογικό να προταθεί ότι οι ανταλλαγές νερού των κυττάρων ελέγχονται από το κενοτόπιο και επιπλέον, ως πρώτη προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα ώριμο παρέγχυμα κύτταρο συμπεριφέρεται ως οσμόμετρο. Σε μια τέτοια κατάσταση η συμβολή του μητρικού είναι ($\Psi_m = 0$).



Εικόνα 30. Διάγραμμα ενός (A) μερισθηματικού και (B) ώριμου παρεγχύματος κυττάρου από υψηλότερα φυτά. (Water stress on plants, G. M. Simpson)

Το δυναμικό της διαλυτής ουσίας (Ψ_s) καθορίζεται από τη συγκέντρωση των οσμωτικών ενεργών ουσιών στο χυμοτόπιο και είναι ίδιο με την οσμωτική πίεση του σφρίγγους χυμοτοπίου, αλλά με αρνητικό πρόσημο. Κατά συνέπεια το Ψ_s είναι κοντά στο μηδέν σε πλήρως ενυδατωμένα κύτταρα από ότι σε αφυδατωμένα λόγω από τις συνακόλουθες μεταβολές στον όγκο του κυττάρου, και η σχέση του Ψ_s στον όγκο των κυττάρων είναι περίπου γραμμική όπως φαίνεται στην εικόνα 31. Μεταξύ του όγκου της απώλειας νερού (ΔV) του νερού (ψ), των συνιστωσών δυναμικών του, της διαλυτής ουσίας (Ψ_s), και του δυναμικού πίεσης (Ψ_p), η σχέση αυτή δείχνει ένα κύτταρο που παρουσιάζει ιδανική οσμωτική συμπεριφορά. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το σημείο της αρχικής πλασμόλυσης.



Εικόνα 31. Σχέση μεταξύ του όγκου της απώλειας νερού (ΔV) του νερού (ψ) και των συνιστωσών δυναμικών του, της διαλυτής ουσίας (Ψ_s), και δυναμικό πίεσης (Ψ_p), σε κύτταρο που παρουσιάζει ιδανική οσμωτική συμπεριφορά. (Water stress on plants, G. M. Simpson)

Οι αλλαγές στον όγκο των κυττάρων είναι επίσης υπεύθυνες για την ανάπτυξη του δυναμικού πίεσης (Ψ_p). Όταν το νερό εισάγεται στο κύτταρο ο όγκος του χυμοτοπίου αυξάνεται και η πίεση σπαργής ασκείται στα κυτταρικά τοιχώματα. Συγχρόνως μια πίεση ίση με την πίεση σπαργής αναπτύσσεται σε αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή από τα κυτταρικά τοιχώματα προς το εσωτερικό των κυττάρων. Αυτή η τελευταία πίεση, αποκαλούμενη πίεση τοιχώματος, δρα όπως η υδροστατική πίεση, αυξάνοντας το ενεργειακό επίπεδο του νερού μέσα στο κύτταρο και αντιπροσωπεύει το δυναμικό πίεσης του κυττάρου (Ψ_p). Προφανώς το Ψ_p παίρνει θετικές τιμές εφ' όσον ασκεί μια πίεση χυμοτοπίου στα περιβαλλόμενα τοιχώματα. Δεδομένου ότι το νερό χάνεται από το κύτταρο, το χυμοτόπιο συστέλλεται σταδιακά, με μια συνακόλουθη πτώση στην σπαργή των κυττάρων και το Ψ_p έχει μια

καμπυλόγραμμη διαμόρφωση όπως φαίνεται στην εικόνα 31. Το Ψ_p γίνεται αρχικά μηδέν στην αρχική πλασμόλυση, όπου το χυμοτόπιο παύει να πιέζει τα τοιχώματα. Οι αρνητικές τιμές του Ψ_p εμφανίζονται από, ένα εσωτερικό τράβηγμα από τα συστελλόμενα τοιχώματα χυμοτοπίου.

Το διάγραμμα της εικόνας 31 οδηγεί σε δύο σημαντικά συμπεράσματα.

(1) Εξαιτίας της μεγάλης σημασίας της σπαργής των κυττάρων σε πολλές φυσιολογικές διαδικασίες, μια συντήρηση του Ψ_p επάνω από το μηδέν σε σχετικά υψηλά επίπεδα αφυδάτωσης πρέπει να είναι ευεργετική για τα φυτά που αναπτύσσονται σε ξηρές περιοχές. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί από έναν ελαστικότερο κυτταρικό τοίχωμα, το οποίο καθιστά την πτώση του Ψ_p λιγότερο απότομη κατά την αυξανόμενη αφυδάτωση του.

(2) Είναι δυνατόν να πραγματοποιείται μια συσσώρευση οσμωτικών ενεργών ουσιών στο χυμοτόπιο. Αυτό οδηγεί σε μια πτώση του Ψ_s σε τιμές πιο αρνητικές από εκείνες που αναμένονται από μια απλή μείωση του όγκου που προκαλείται από την αφυδάτωση των κυττάρων.

Αυτή η συγκέντρωση διαλύματος στα κύτταρα που υποβάλλονται στην πίεση του νερού αποτελεί έναν μηχανισμό προσαρμογής γνωστό ως οσμορύθμιση. Τα ευεργετικά αποτελέσματα της οσμορύθμισης είναι.

α) επιτρέπει στα κύτταρα να χάσουν περισσότερο νερό πριν η σπαργή πέσει στο μηδέν,

β) αυξάνει το δυναμικό των κυττάρων για να απορροφήσουν νερό υπό ξηρές συνθήκες με το χαμηλότερο δυναμικό νερού των κυττάρων και τη διατήρηση έτσι μιας πιθανής μεταβολής μεταξύ των κυττάρων των φυτών και του απαραίτητου μέσου τους για τη μετακίνηση του νερού προς τα κύτταρα.

10.2 Μέτρηση των συνισταμένων δυναμικών νερού στα κύτταρα

Το δυναμικό νερού είναι ένα σημαντικό και ευαίσθητο μέτρο του επιπέδου του νερού του φυτού, και ποικίλλει από κοντά στο μηδέν σε ατονισμένα φυτά μέχρι μια τιμή χαμηλότερη από το οσμωτικό δυναμικό στα πολύ τονισμένα. Επιπλέον, ένα δεδομένο δυναμικό νερού δείχνει τον ίδιο βαθμό πίεσης νερού σε όλα τα είδη ιστού, ενώ το οσμωτικό δυναμικό σε πλήρες σπαργή μπορεί να είναι $-1,5$ MPa σε πλήρες κορεσμένο μεσόφυτο και λιγότερο από $-3,0$ MPa σε ένα αλοφυτο. Επίσης, το δυναμικό εδαφικού νερού μπορεί να μετρηθεί και να συγκριθεί με τα δυναμικά νερού των φυτών. Αυτό είναι σημαντικό επειδή η μετακίνηση του νερού από το έδαφος στα φυτά, καθώς και μέσα στα φυτά, εμφανίζεται από περιοχές με υψηλότερο προς περιοχές με χαμηλότερο δυναμικό νερού.

Οι μέθοδοι για την μέτρηση των διάφορων συστατικών του δυναμικού νερού των κυττάρων είναι οι εξής:

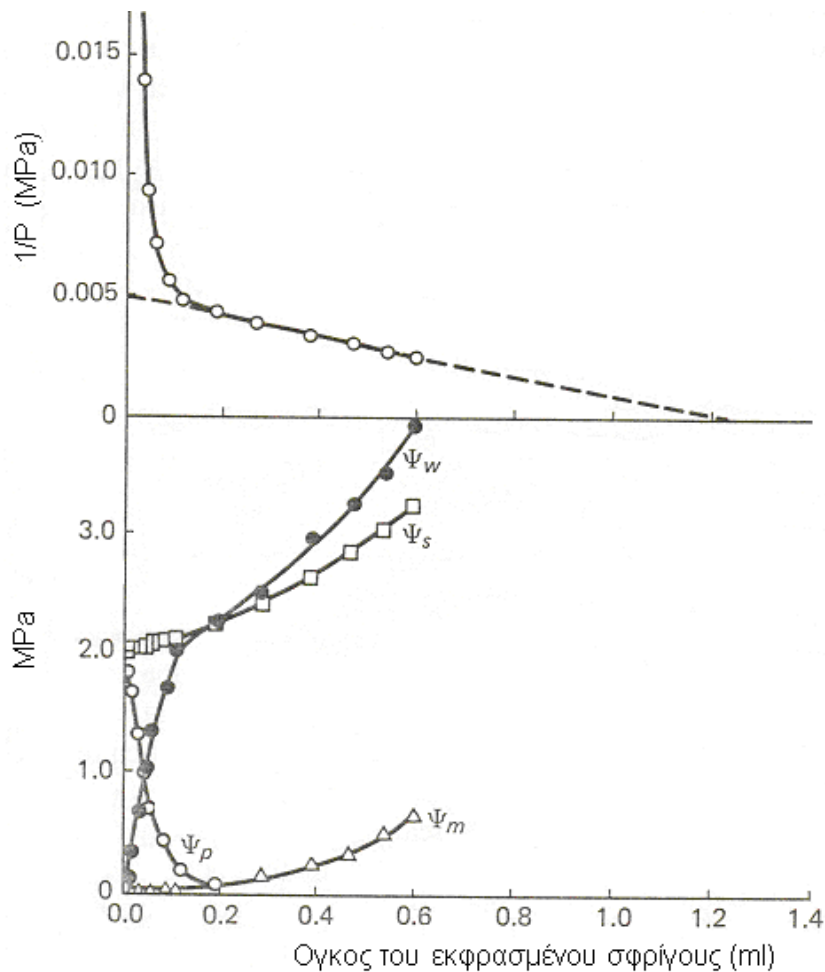
Το συνολικό δυναμικό νερού των φύλλων μετριέται στα φύλλα με ψυχρόμετρα θερμοηλεκτρικά ζεύγη ή στους μίσχους με θάλαμο πίεσης Scholander. Το οσμωτικό δυναμικό μετριέται κρυσκοπικά σε δείγματα σφρίγους όπου εκφράζεται από ένα φυτικό ιστό που μαραίνεται από το παγετό. Οι μετρήσεις μπορούν επίσης να γίνουν σε πολύ μικρά δείγματα του σφρίγους με διάφορους τύπους οσμόμετρων που είναι εμπορικά διαθέσιμοι.

Ο καλύτερος τρόπος να αποφευχθεί το σφάλμα του διαλύματος είναι να χρησιμοποιηθεί η τεχνική πίεσης-όγκου Tyree και Hammel. Αυτή η μέθοδος είναι αργή και απαιτεί περισσότερο ιστό από ότι τα ψυχρόμετρα θερμοηλεκτρικών ζευγών. Το στομφώδες δείγμα, συνήθως είναι ένας κλαδίσκος ή ένας μίσχος που έχει διάφορα φύλλα, τοποθετείται σε ένα θάλαμο πίεσης και υποβάλλεται σε σταδιακές αυξήσεις στην πίεση, ενώ ο όγκος του σφρίγους που εκφράζεται σε κάθε πίεση μετριέται και τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για να κατασκευάσουν μια καμπύλη πίεσης-όγκου όπως φαίνεται στην εικόνα 32 από την οποία είναι δυνατό να υπολογιστεί το συνολικό δυναμικό νερού και το οσμωτικό δυναμικό. Η καμπύλη πίεσης-όγκου είναι από το φυτό *Ilex opaca*. Η τεταγμένη είναι το αντίστροφο της πίεσης και η τετμημένη ο όγκος του νερού που εκφράζεται σε ml. Η διακεκομμένη γραμμή είναι η υπολογισμένη επέκταση του γραμμικού μέρους της καμπύλης όπου κόβει την τεταγμένη στα 0.0051 MPa, όπου ισούται με $-1,96$ MPa του οσμωτικού

δυναμικού και με την τετμημένη στα 1,23 ml. Τα δεδομένα στην γραφική παράσταση λήφθηκαν από την ανάλυση της καμπύλης πίεσης-όγκου σύμφωνα με τη μέθοδο Tyree και Hammel. Οι καμπύλες παρουσιάζονται για την σπαργή (Ψ_p), την όσμωση (Ψ_s), το μητρικό δυναμικό (Ψ_m) και το συνολικό δυναμικό νερού (Ψ_w). Το δυναμικό σπαργής είναι θετικό, ενώ όλα τα άλλα δυναμικά είναι αρνητικά. Οι μονάδες της τετμημένης είναι σε ml όγκου νερού, και της τεταγμένης σε MPa.

Η πίεση σπαργής είναι σημαντική όσον αφορά στη διεύρυνση των κυττάρων, τις μετακινήσεις των προστατευόμενων κυττάρων, και άλλες διαδικασίες όπου εξαρτώνται από τις αλλαγές στον όγκο των κυττάρων και της διαπερατότητας του νερού και των ιόντων κατά την πίεση σπαργής. Κατά συνέπεια, είναι επιθυμητές αξιόπιστες εκτιμήσεις της πίεσης σπαργής. Συνήθως η διαφορά μεταξύ Ψ_w και π , ποικίλλει από μηδέν σε ένα χαλαρό κύτταρο μέχρι μια τιμή ίση με αυτήν του οσμωτικού δυναμικού σε ένα πλήρες στομφώδες κύτταρο, όπως παρουσιάστηκε στην εικόνα 27 όπου οι άμεσες μετρήσεις της πίεσης σπαργής γίνονται τώρα με μικρομανόμετρο που συνδέεται με έναν τριχοειδή σωλήνα που εισέρχεται σε ένα κύτταρο, αλλά η μέθοδος ισχύει μόνο στα μεγάλα κύτταρα.

Γενικά η επέκταση των κυττάρων προκαλείται από την πίεση σπαργής όπου ενεργείται στα εκτεταμένα κυτταρικά τοιχώματα. Εντούτοις, υπάρχει αντίθεση επειδή η πραγματική κατευθυντήρια δύναμη που προκαλεί τη διεύρυνση των κυττάρων παράγεται με τη διάχυση του νερού στα κύτταρα, και η πίεση σπαργής είναι αποτέλεσμα του αυξανόμενου όγκου του σφρίγγους χυμοτοπίου. Η επέκταση των κυττάρων και η πίεση σπαργής προκαλούνται από την εσωτερική διάχυση του νερού ως αποτέλεσμα μιας διαφοράς στο Ψ_w μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού των κυττάρων.



Εικόνα 32. Καμπύλη πίεσης-όγκου για το φυτό *Ilex opaca*. Οι καμπύλες παρουσιάζουν την σπαργή (Ψ_p), την όσμωση (Ψ_s), το μητρικό δυναμικό (Ψ_m) και το συνολικό δυναμικό νερού (Ψ_w). Το δυναμικό σπαργής είναι θετικό, ενώ όλα τα άλλα δυναμικά είναι αρνητικά. (Water relations of plants, Paul J. Kramer, Academic Press inc 1983)

10.3 Δυναμικό όσμωσης και σπαργής

Το οσμωτικό δυναμικό και η οσμορύθμιση παράλληλα με την πίεση σπαργής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διεύρυνση των κυττάρων, το άνοιγμα των στομάτων, και τη συντήρηση της μορφής στα ποώδη φυτά. Επίσης ελέγχει τη διαπερατότητα των κυτταρικών μεμβρανών σε μερικά άλγη και ενδεχομένως σε άλλα κύτταρα. Ο μηχανισμός του οποίου η πίεση νερού μπορεί να έχει επιπτώσεις στις μεταβολικές διαδικασίες είναι οι αλλαγές στην πίεση σπαργής. Αυτή η διαδικασία λειτουργεί με την αλλαγή των χωρικών σχέσεων των ενζύμων στις μεμβράνες των κυττάρων και με αυτόν τον τρόπο υπάρχει επιρροή στις διαδικασίες των ενζύμων.

10.4 Οσμωρύθμιση

Η πίεση νερού οδηγεί στο χαμήλωμα του οσμωτικού δυναμικού του φυτικού ιστού σε μερικά φυτά. Αυτό συμβάλλει στη συντήρηση της σπαργής και πιθανώς στη συντήρηση της κανονικής μεταβολικής δραστηριότητας. Μέρος της μείωσης στο οσμωτικό δυναμικό προκαλείται από τη συγκέντρωση διαλυτών ουσιών στα κύτταρα ως αποτέλεσμα της απώλειας νερού. Η οσμωτική ρύθμιση αναφέρεται σε μια καθαρή αύξηση των διαλυτών ουσιών, όπως διακρίνεται από την παθητική αύξηση στη συγκέντρωση που προκαλείται από την απώλεια νερού. Είναι σημαντικό επειδή οδηγεί στη συντήρηση της σπαργής σε ένα χαμηλότερο Ψ_w .

10.5 Το υδάτινο δυναμικό και τα συστατικά του

Η θερμοδυναμική παράμετρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την ενεργειακή θέση του νερού στα φυτά είναι το υδάτινο δυναμικό. Αυτή η παράμετρος, οριζόμενη ως Ψ , ορίζεται ως:

$$\Psi = \frac{\mu_w - \mu_w^*}{\bar{V}_w} \quad (2)$$

όπου μ_w , είναι το χημικό δυναμικό, ή η ελεύθερη ενέργεια ανά γραμμομόριο νερού σε κάποιο σημείο του συστήματος σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση, μ_w^* είναι το χημικό δυναμικό του καθαρού νερού στην ίδια θερμοκρασία και ατμ. πίεση, και \bar{V}_w είναι ο μερικός μοριακός όγκος του νερού. Η ποσότητα, $\mu_w - \mu_w^*$ στην εξίσωση 2 αντιπροσωπεύει το έργο που κινεί ένα γραμμομόριο νερού από κάποιο σημείο μέσα στο σύστημα σε μια κοιλότητα καθαρού νερού στην ίδια θερμοκρασία και ατμ. πίεση. Στα φυτά, το Ψ ποικίλλει από μηδέν και προς αρνητικές τιμές και μετριέται σε MPa. Εναλλακτικές μονάδες μέτρησης ακόμα είναι το bar και Jm^{-3} .

Για ένα φυτικό κύτταρο, το Ψ μπορεί να εκφραστεί ως ποσό των τριών συστατικών:

$$\Psi = P + \pi + \tau \quad (3)$$

Όπου το P είναι η υδροστατική πίεση (ή πίεση σπαργής), π είναι το οσμωτικό δυναμικό και τ είναι το μητρικό δυναμικό. Σε ισορροπία, το Ψ είναι το ίδιο στο χυμοτόπιο, το κυτταρόπλασμα και το κυτταρικό τοίχωμα. Εντούτοις, τα συστατικά του Ψ μπορούν να διαφέρουν εμφανώς σε αυτές τις φάσεις. Για το νερό στο χυμοτόπιο και το κυτταρόπλασμα (νερό συμπλάστη), τα κυρίαρχα συστατικά είναι συνήθως το P και π , με το P να έχει συνήθως μια θετική τιμή. Ένα κύτταρο σε ισορροπία, το P και π είναι πιθανώς ομοιόμορφα σε όλο το συμπλάσμα, δεδομένου ότι είναι απίθανο να υπάρξουν σημαντικές μεταβολές πίεσης στις οριοθετώντες μεμβράνες του χυμοτοπίου και των κυτταροπλασματικών κυτταρικών οργάνων. Σε μερικά αλλόφυτα, το P και το π μαζί, μπορεί να είναι σημαντικά συστατικά του Ψ στο αποπλάστη.

Μέσα σε έναν ιστό, οι συμπλασματικές τιμές του P και π μπορούν να ποικίλουν σημαντικά από κύτταρο σε κύτταρο, ακόμη και σε ισορροπία.

Στην ισορροπία, το Ψ στο σύμπλασμα του ιστού μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Psi = \bar{P} + \bar{\pi} \quad (4)$$

Εκτός από το νερό στα τοιχώματα των ζωντανών κύτταρων, ο ιστός αποπλάστη περιλαμβάνει το νερό μέσα στα τοιχώματα όπως τα στοιχεία αγγείων, τριχίδια και ίνες. Κυρίαρχο συστατικό του Ψ στον αποπλασματικό ιστό είναι συνήθως το \bar{P} . Κατά την ισορροπία, το Ψ στον αποπλασματικό ιστό είναι ίσο με το Ψ στον συμπλασματικό ιστό.

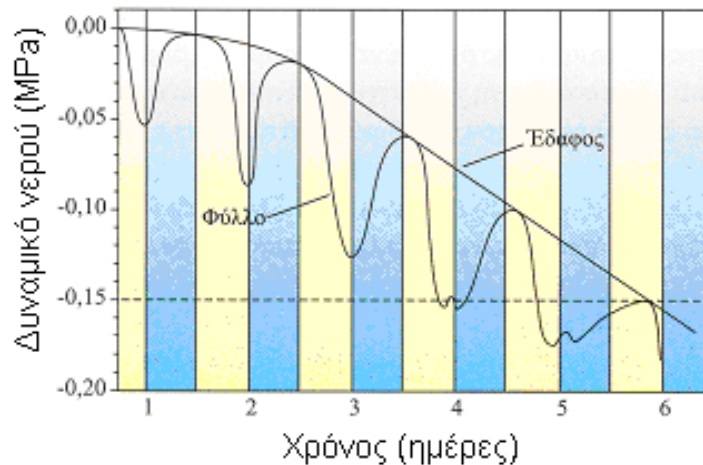
Ο όρος της βαρύτητας συμπεριλαμβάνεται συχνά ως συστατικό του Ψ . Ο καθορισμός του Ψ από την άποψη του μ_w αγνοεί τις εξωτερικές δυνάμεις. Ως εκ τούτου, είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί μια χωριστή δύναμη βαρύτητας, G , στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βαρύτητας. Το συνολικό υδάτινο δυναμικό μπορεί έπειτα να οριστεί ως $\Psi + G$.

Μετά την ανάπτυξη των τεχνικών για ακριβή μέτρηση του Ψ και των συστατικών του στα υψηλότερα φυτά που αυξάνονται υπό αγροτικές συνθήκες, έχει αναλυθεί η οικολογική σημασία της παραλλαγής σε αυτές τις παραμέτρους για τα φυτά που αυξάνονται σε διαφορετικούς βιότοπους και που εκθέτονται σε διαφορετικές μορφές ανάπτυξης. Έχει τεκμηριωθεί σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των ειδών σε αυτές τις παραμέτρους, ιδιαίτερα σε σχέση με το διαθέσιμο νερό στους βιότοπους. Επίσης έχουν δείξει ότι αυτοί οι παράμετροι μπορούν να ποικίλουν ανάλογα με τους ημερήσιους και εποχιακούς παράγοντες.

10.6 Το δυναμικό νερού σε κατάσταση υδάτινης καταπόνησης

Τα κύτταρα και οι ιστοί θεωρούνται ανεπαρκείς σε νερό όταν δεν είναι σε πλήρες σπαργή δηλαδή όταν το δυναμικό νερού τους είναι κάτω από μηδέν. Ο όρος πίεση νερού χρησιμοποιείται επίσης για να εκφράσει μια τέτοια κατάσταση, και το δυναμικό νερού θεωρείται ως κατάλληλο μέτρο της πίεσης δεδομένου ότι έχει τις ίδιες φυσικές διαστάσεις με τη μηχανική πίεση. Οι φυτικοί ιστοί ποτέ δεν φθάνουν σε μηδενικό δυναμικό νερού ακόμα και όταν αναπτύσσονται σε υδάτινη καλλιέργεια. Στα φυτά η πίεση νερού αναφέρεται στις εκκινήσεις των φυσιολογικών διαδικασιών που είναι εκτός των κανονικών όταν προσκληθούν από μια ξηρασία.

Κατά την υδάτινη καταπόνηση η ισορροπία του νερού σε ένα ιστό προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ της απορρόφησης και της διαπνοής. Καθώς το εδαφικό νερό αφαιρείται και το δυναμικό εδαφικού νερού μειώνεται σε πιο αρνητικές τιμές, τα φυτά πρέπει να μειώσουν το δυναμικό νερού τους (είτε από την απλή αφυδάτωση είτε από τη συσσώρευση διαλυτής ουσίας) για να στηρίξουν την απαραίτητη πιθανή μεταβολή για την απορρόφηση του νερού. Συγχρόνως, η απορρόφηση γίνεται δυσκολότερη λόγω της μεγάλης αύξησης στην εδαφική αντίσταση. Το δυναμικό νερού των φυτών γίνεται έτσι σταδιακά πιο αρνητικό με την αυξανόμενη εδαφική ξηρότητα όπως φαίνεται από τις μεταβολές του Ψ στο έδαφος και στα φύλλα στην εικόνα 33. Αρχικά το έδαφος είχε αρδευτεί καλά, αλλά στον χρόνο 0 η άρδευση σταμάτησε. Η διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει το σημείο της μονίμου μαράνσεως, δηλαδή το Ψ των φύλλων στα οποία το περιεχόμενο νερό είναι τόσο λίγο, ώστε θίγονται βασικές κυτταροπλασματικές λειτουργίες, με συνέπεια τον μαρασμό του φυτού.



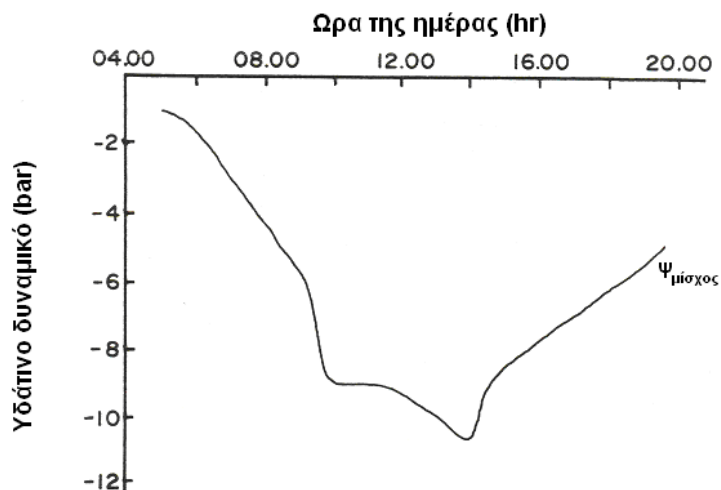
Εικόνα 33. Χρονοδιάγραμμα των μεταβολών του Ψ στο έδαφος και στα φύλλα σε κατάσταση υδάτινης καταπόνησης. (Φυσιολογία φυτών από το μόριο στο περιβάλλον, Β. Γαλάτης, Δ. Γανωτακης, Κ. Γκανη –Σπυροπουλου, Γ.Καραμπουρνιωτης, Κ. Κοτζαμπασης, Ι. Κωνσταντινιδου, Ι Μανετας, Κ. Ρουμπελακη-Αγγελακη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης)

Τη νύχτα, όταν παύει η διαπνοή, τα καθημερινά ελλείμματα του νερού εξαλείφονται βαθμιαία και το δυναμικό νερού φυτού επιτυγχάνει τελικά ένα είδος ισορροπίας με το δυναμικό του εδαφικού νερού. Το δυναμικό νερού των φυτών υποβάλλεται περισσότερο ή λιγότερο στην χαρακτηριστική μορφή του κατά τη διάρκεια της ημέρας, με τις υψηλότερες τιμές του να είναι την αυγή και το ηλιοβασίλεμα και την ελάχιστη τιμή του τη μεσημβρία όταν η δυσαναλογία μεταξύ της διαπνοής και της απορρόφησης είναι μέγιστη. Όπως βλέπουμε στην εικόνα 34 κατά την ημερήσια αλλαγή του υδάτινου δυναμικού των μίσχων σε μη αρδευόμενα δέντρα μηλιάς κατά την καλοκαιρινή ημέρα.

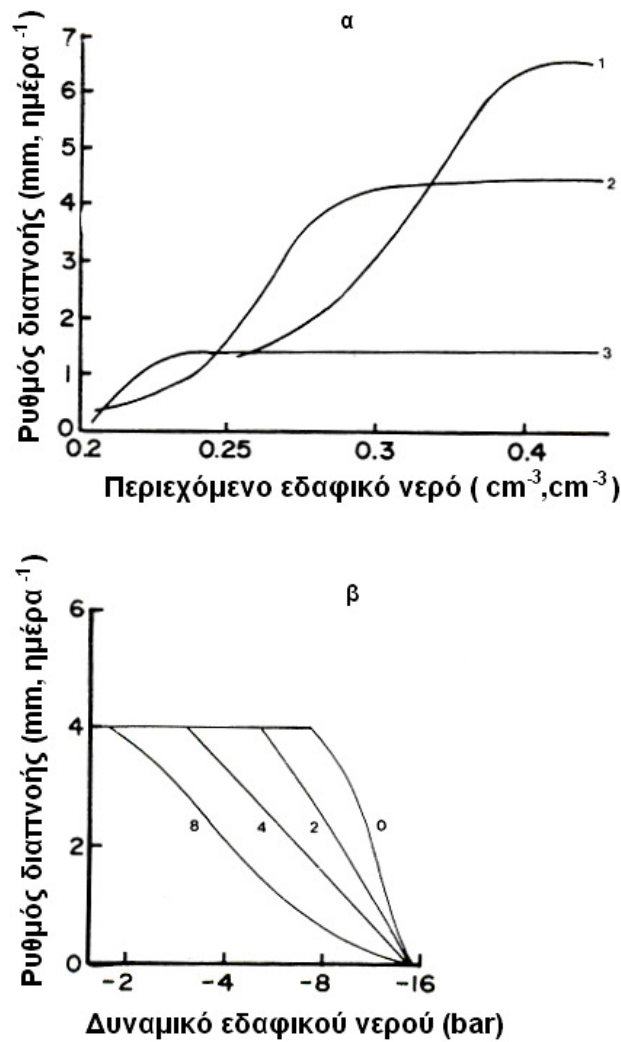
Το εύρος αυτής της καθημερινής τάσης αυξάνεται με την αυξανόμενη εδαφική ξηρότητα. Όταν το δυναμικό εδαφικού νερού μειώνεται κάτω από μια κρίσιμη τιμή, που αντιπροσωπεύει την τελευταία ικανότητα των φυτικών ιστών να αντισταθούν σε μια περαιτέρω μείωση στο δυναμικό νερού τους, σταματά η απορρόφηση και εμφανίζεται η μόνιμη μάρανση.

Αποτελέσματα από διάφορα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν έδειξαν ότι υπό αγροτικές συνθήκες το επίπεδο νερού του φυτού το καθορίζει η εξατμιστική απαίτηση παρά το επίπεδο του εδαφικού νερού όπως βλέπουμε στην εικόνα 35. Στο διάγραμμα δείχνεται (α) η επίδραση των μειωμένων περιεκτικότητας σε εδαφικό νερό στο ποσοστό διαπνοής, σε μέρες υψηλού (καμπύλη 1), συγκρατημένου (καμπύλη 2), και χαμηλού (καμπύλη 3) δυναμικού διαπνοής. Ο έλεγχος στομάτων της διαπνοής μπορεί εύκολα να εμφανιστεί ακόμη και σε επίπεδα υψηλής περιεκτικότητας σε εδαφολογικό νερό όταν το δυναμικό εξάτμισης είναι υψηλό. Εναλλακτικά, τα φυτά δεν ελέγχουν την διαπνοή υπό τις υγρές συνθήκες ακόμη και σε χαμηλή περιεκτικότητα σε εδαφικό νερό. Ενώ στο διάγραμμα (β) παρουσιάζεται η αναμενόμενη επίδραση της πυκνότητας της ρίζας στη σχέση μεταξύ του ποσοστού διαπνοής και του δυναμικού εδαφικού νερού. Οι πυκνότητες της ρίζας είναι 8,4, και 2 cm^3 του εδάφους ανά εκατοστόμετρο του μήκους ρίζας, ενώ 0 cm^3 χρησιμοποιούνται για πολύ πυκνή ριζοβολία. Το δυναμικό εδαφικού νερού είναι λιγότερο περιοριστικό στις υψηλές πυκνότητες ρίζας απ'ό,τι στις χαμηλές πυκνότητες.

Εναλλακτικά, η έκταση του ριζικού συστήματος, που καθορίζει την ικανότητα για τη λήψη του νερού, μπορεί επίσης να διαδραματίσει έναν σημαντικό ρόλο.



Εικόνα 34. Ημερήσια αλλαγή του υδάτινου δυναμικού των μίσχων σε μη αρδευόμενα δέντρα μηλιάς. (Water stress on plants, G. M. Simpson)

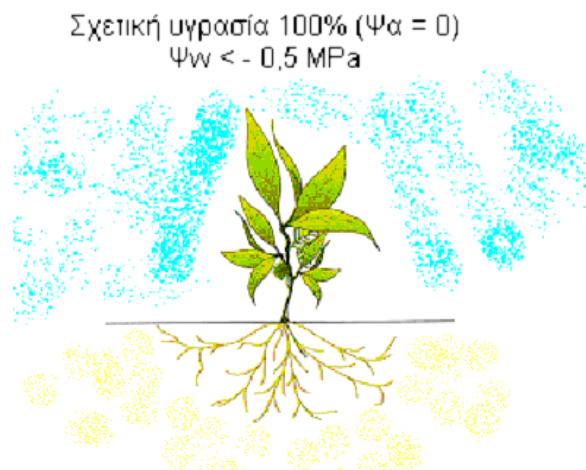


Εικόνα 35. (α) Επίδραση των μειωμένων περιεκτικοτήτων σε εδαφικό νερό στο ποσοστό διαπνοής, και (β) προς την πυκνότητα της ρίζας στη σχέση μεταξύ του ποσοστού διαπνοής και του δυναμικού εδαφικού νερού. (Water stress on plants, G. M. Simpson)

Όταν το υδατικό δυναμικό στο έδαφος μειώνεται, αναγκαστικά μειώνεται και στα φύλλα. Η υπάρχουσα τάση που είναι το υδατικό δυναμικό των φύλλων διατηρείται πάντα χαμηλότερο από αυτό του εδάφους, ώστε να είναι δυνατή η άντληση του νερού. Επομένως, είναι αυτονόητο ότι η μείωση του υδατικού δυναμικού στα φύλλα οδηγεί σε απώλεια σπαργής και κλείσιμο των στομάτων. Μαραμένα φύλλα δεν μπορούν να έχουν ανοιχτά στόματα. Πρόσφατα πειράματα, όμως, έδειξαν ότι το φαινόμενο είναι περισσότερο περίπλοκο. Στην πειραματική διάταξη της εικόνας 36, το φυτό αναπτύσσεται υπό υδατική επάρκεια και στη συνέχεια υπόκειται σε υδατική καταπόνηση στη ρίζα, ενώ το υπέργειο μέρος του

κλείνεται σε θάλαμο με σχετική υγρασία 100% και φωτίζεται. Εφόσον το υδατικό δυναμικό στην κλειστή ατμόσφαιρα είναι ίσο με 0 MPa, το νερό από την ατμόσφαιρα θα τροφοδοτεί τα φύλλα, τα οποία, με τον τρόπο αυτό, δεν υφίστανται υδατική καταπόνηση. Γίνεται δηλαδή μια αντιστροφή της φυσιολογικής κλιμάκωσης του δυναμικού του νερού.

Παρ' ότι θα περίμενε κανείς σε ένα τέτοιο πείραμα τα στόματα των φύλλων να παραμένουν ανοιχτά, εν τούτοις αυτά κλείνουν. Πρέπει κατά συνέπεια να γίνει δεκτό ότι κάποιο σήμα από το υπόγειο μέρος του φυτού πληροφορεί τα φύλλα για την υδατική κατάσταση του εδάφους. Επιπλέον, το σήμα αυτό φαίνεται να ακυρώνει όλες τις υπόλοιπες περιβαλλοντικές επιδράσεις στα στόματα. Όπως ήδη αναφέρθηκε, το φως, η υψηλή σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, η επάρκεια νερού στο φύλλο και η λόγω φωτοσύνθεσης μείωση του CO₂ στον υποστομάτιο θάλαμο δρουν προς την ίδια κατεύθυνση, δηλαδή ευνοούν το άνοιγμα των στομάτων.



Εικόνα 36. Το υπόγειο μέρος του φυτού υφίσταται υδατική καταπόνηση, ενώ το υπέργειο διαθέτει υπερεπάρκεια νερού. Παρόλα αυτά τα στόματα κλείνουν. (Φυσιολογία φυτών από το μόριο στο περιβάλλον, Β. Γαλατης, Δ. Γανωτακης , Κ. Γκανη –Σπυροπουλου, Γ.Καραμπουρνιωτης, Κ. Κοτζαμπασης, Ι. Κωνσταντινιδου, Ι Μανετας, Κ. Ρουμπελακη-Αγγελακη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης)

10.7 Τεχνικές για μέτρηση του Ψ

Διάφορες τεχνικές είναι διαθέσιμες σήμερα για τη μέτρηση του Ψ στους ιστούς των φυτών. Οι κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τα υψηλότερα φυτά που αυξάνονται υπό αγροτικές συνθήκες είναι οι τεχνικές του ψυχομετρικού και πιεστικού θαλάμου.

10.7.1 Ψυχομετρικές τεχνικές

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούν τα ψυχομετρικά θερμοηλεκτρικά ζεύγη χρησιμοποιούνται ευρέως για τις μετρήσεις του Ψ στα υψηλότερα φυτά. Για τα φυτά όπου αυξάνονται υπό αγροτικές συνθήκες, οι ψυχομετρικές τεχνικές είναι χρήσιμες κάτω από τις περιστάσεις στις οποίες τα αποκομμένα δείγματα ιστού μπορούν να μεταφερθούν στις εργαστηριακές εγκαταστάσεις όπου ελέγχονται ως προς τη θερμοκρασία.

Όταν ένα δείγμα ιστού τοποθετείται σε ένα κλεισμένο ψυχομετρικό θάλαμο με μια σταθερή θερμοκρασία, το νερό στο δείγμα θα εξισορροπηθεί με την ατμόσφαιρα του θαλάμου. Με τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας ισορροπίας (h) της ατμόσφαιρας, τα ψυχομετρικά θερμοηλεκτρικά ζεύγη επιτρέπουν στην τιμή του Ψ στο δείγμα να υπολογιστεί ως:

$$\Psi = \frac{RT \ln(h)}{\bar{V}_w} \quad (5)$$

όπου το R είναι η γενική σταθερά αερίου και T είναι η θερμοκρασία σε Kelvin.

Σημαντικό είναι ότι η απώλεια του νερού από το δείγμα στην ατμόσφαιρα του θαλάμου κατά τη διάρκεια της περιόδου ισορρόπησης δεν έχει επιπτώσεις στην τιμή του Ψ στο δείγμα.

Για τη μέτρηση του h στον ψυχρομετρικό θάλαμο, τρεις διαθέσιμες τεχνικές:

Στην πρώτη τεχνική, το καθαρό νερό επιτρέπεται να εξατμιστεί στην ατμόσφαιρα του θαλάμου από την επιφάνεια μιας σύνδεσης θερμοηλεκτρικών ζευγών. Στην πράξη, η ψυχρομέτρηση είναι βαθμολογημένη με διαλύματα από γνωστές συγκεντρώσεις για να παρέχει ένα παράγοντα μετατροπής που αφορά την έξοδο των θερμοηλεκτρικών ζευγών (σε microvolts) στο Ψ . Δύο διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί για την τοποθέτηση του καθαρού νερού επάνω στην σύνδεση των θερμοηλεκτρικών ζευγών. Η μια διαδικασία ονομάζεται επίδραση Peltier όπου χρησιμοποιεί ένα δροσερό ρεύμα για να μειώσει τη θερμοκρασία της σύνδεσης κάτω από το σημείο δρόσου της ατμόσφαιρας του θαλάμου, προκειμένου να συμπυκνωθεί το νερό πάνω σε αυτό. Μια άλλη διαδικασία περιλαμβάνει την τοποθέτηση με το χέρι ενός μικρού ποσού καθαρού νερού επάνω στην σύνδεση πριν από τη μέτρηση. Λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας της, η διαδικασία που υιοθετεί την επίδραση Peltier έχει αποδειχθεί πιο προσαρμόσιμη για αγροτική χρήση.

Η δεύτερη τεχνική, γνωστή ως υγρομέτρηση σημείου δρόσου, μετρά τη θερμοκρασία στο σημείο δρόσου παρά την κατάθλιψη του υγρού-βολβού προκειμένου να καθοριστεί το h . Τα υγρόμετρα σημείου δρόσου κρατούν τη σύνδεση θερμοηλεκτρικών ζευγών σε σταθερό σημείο δρόσου από τα παλλόμενα δροσερά ρεύματα. Πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι η κατάθλιψη στο σημείο δρόσου είναι μεγαλύτερη από την κατάθλιψη του υγρού-βολβού.

Στην τρίτη τεχνική, η αλλαγή στη θερμοκρασία της σύνδεσης των θερμοηλεκτρικών ζευγών μετριέται όταν διαλύματα με διαφορετικές τιμές Ψ είναι τοποθετημένα επάνω στην σύνδεση. Εάν ένα διάλυμα έχει μια τιμή Ψ ίση με αυτήν του δείγματος που χρησιμοποιείται, και όταν το δείγμα έρθει σε ισορροπία με την ατμόσφαιρα του θαλάμου, τότε δεν θα εμφανιστεί καμία μετακίνηση υδρατμού και η έξοδος των θερμοηλεκτρικών ζευγών θα είναι μηδέν. Αυτό είναι το ισοπνευστικό σημείο. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει περισσότερα βήματα από τις άλλες, έχει το ίδιο πλεονέκτημα με την τεχνική σημείου δρόσου δεδομένου ότι η ισορροπία διαταραχής υδρατμού μέσα στον θάλαμο ελαχιστοποιείται κοντά στο ισοπνευστικό σημείο. Αυτό

ελαχιστοποιεί το σφάλμα που συνδέεται με μια υψηλή αντίσταση στην ανταλλαγή υδρατμού μεταξύ του δείγματος και της ατμόσφαιρας του θαλάμου.

Ψυχρομετρικά θερμοηλεκτρικά ζεύγη έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για να μετρήσουν το Ψ σε αποκομμένα δείγματα ιστού. Η ανάγκη για την συνεχή μη καταστρεπτική παρακολούθηση του Ψ στα άθικτα φύλλα έχει προαγάγει την ανάπτυξη του κανονικού ψυχρομετρικού. Η μερική διάλυση ή το γδάρισμα της επιδερμίδας του φύλλου και η χρησιμοποίηση ενώσεων όπως κερί και λανολίνη για να σφραγιστεί ο ψυχρομετρικός θάλαμος στην επιφάνεια των φύλλων έχει βοηθήσει ώστε να ασφαλιστεί η ισορροπία αμού όπου επιτυγχάνεται με κανονικά ψυχρομετρικά. Αυτές οι καινοτομίες έχουν βοηθήσει επίσης ώστε να μειώσουν την αρχική περίοδο ισορρόπησης και να μειώσουν το χρόνο απόκρισης για τις αλλαγές του Ψ σε λεπτά. Κατά συνέπεια, τα κανονικά ψυχρομετρικά φύλλων εμφανίζονται να είναι κατάλληλα για το συνεχή έλεγχο του Ψ ακόμη και στα φυτά όπου το Ψ κυμαίνεται γρήγορα. Τα ψυχρομετρικά των μίσχων και ρίζας έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης με κάποια επιτυχία.

Οι τρεις συνηθισμένες πηγές του σφάλματος που συνδέεται με τα ψυχρομετρικά θερμοηλεκτρικά ζεύγη είναι:

- (1) ανισορροπίες στην πίεση υδρατμού,
- (2) θερμικές αποκλίσεις και αστάθειες,
- (3) αλλαγές στο Ψ του δείγματος λόγω της αύξησης και της αποκοπής.

Ανισόρροπες πιέσεις του υδρατμού, εκτός από εκείνες που σχετίζονται με τις θερμικές αποκλίσεις και την αστάθεια, προκαλούνται από τις κοιλότητες του νερού μέσα στο ψυχρομετρικό θάλαμο και από την αντίσταση στη διάχυση του υδρατμού από το δείγμα στην ατμόσφαιρα του θαλάμου. Το πρώτο μπορεί να μειωθεί με την κατάλληλη επιλογή υλικών του θαλάμου, της ευσυνείδητης καθαριότητας, και της μεγιστοποίησης της περιοχής επιφάνειας των δειγμάτων ανά μονάδα όγκου του θαλάμου. Τα άλατα και τα άλλα ξένα υλικά επάνω στην επιφάνεια των δειγμάτων μπορούν επίσης να απορροφήσουν υδρατμούς. Το πλύσιμο του δείγματος με αποσταγμένο νερό και η ξήρανση του λεπτομερώς πριν από τη μέτρηση είναι καλές προφυλάξεις.

Οι θερμικές αποκλίσεις και η αστάθεια προκαλούνται από την παραγωγή θερμότητας από αναπνοής στο δείγμα, από αποκλίσεις ή διακυμάνσεις στην θερμοκρασία του περιβάλλοντος, και από την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας και η αστάθεια παράγουν λάθη στη μέτρηση του Ψ και αναγκάζουν την ατμόσφαιρα του θαλάμου να διαφέρει σε θερμοκρασία από το δείγμα ή να προκληθεί ηλεκτρικό δυναμικό, ανάμεσα στο μετρηθέντα κύκλωμα. Τα αποτελέσματα της παραγωγής θερμότητας αναπνοής μπορούν να μειωθούν με την βεβαίωση καλής επαφής μεταξύ του δείγματος και θαλάμου και τη χρησιμοποίηση υλικών θαλάμου με υψηλή θερμική αγωγιμότητα.

10.7.2 Τεχνική πιεστικών θαλαμών

Η τεχνική των πιεστικών θαλαμών έχει προκύψει ως η ευρύτετα χρησιμοποιημένη μέθοδος για το Ψ στα υψηλά φυτά όπου αυξάνονται υπό αγροτικές συνθήκες. Αυτό προέρχεται σε μεγάλο μέρος από την απλότητα, την αξιοπιστία της και την έλλειψη απαίτησής για ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας. Μια διάταξη για την μέτρηση του δυναμικού νερού στο φύλλο παρουσιάζεται στην εικόνα 37.



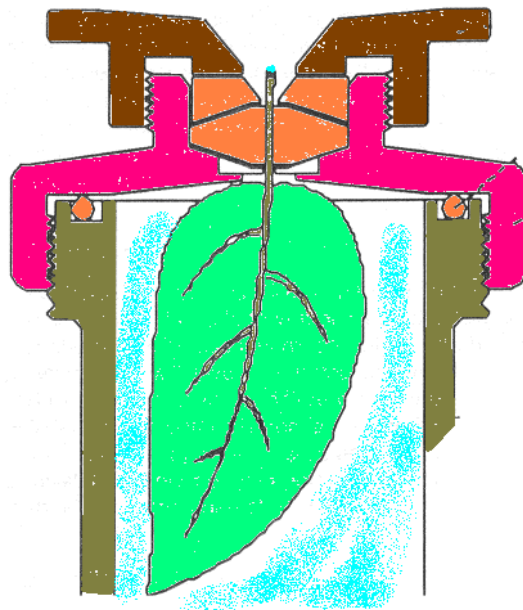
Εικόνα 37. Διάταξη ενός οργάνου πιεστικού θαλάμου. (Από το πείραμα που πραγματοποιήσα)

Η τεχνική των πιεστικών θαλαμών μετράει την αποπ्लाσματική τιμή του \bar{P} όταν είναι ίση με την συμπλασματική τιμή του Ψ ενώ ο ιστός είναι σε ισορροπία.

Μόλις σταματήσει η διαπνοή, οι αποπ्लाσματικές και συμπλασματικές τιμές του Ψ θα συγκλίνουν. Αυτή η σύγκλιση θα εμφανιστεί αρκετά γρήγορα στα περισσότερα φύλλα, με οποιαδήποτε ανισορροπία μεταξύ του αποπλάστη και συμπλάστη που εξαφανίζεται κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος μεταξύ της αποκοπής του φύλλου και της μέτρησης με τον θάλαμο πίεσης. Η τιμή ισορροπίας του Ψ θα επηρεαστεί από τις αποπ्लाσματικές και συμπλασματικές χωρητικότητες. Δεδομένου ότι η χωρητικότητα του συμπλάστη είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από

αυτή του αποπλάστη, η τιμή ισορροπίας του Ψ θα απεικονίσει τη συμπλασματική τιμή του Ψ κατά την διάρκεια της αποκοπής των φύλλων.

Κατά συνέπεια, η τεχνική των πιεστικών θαλαμών θεωρητικά είναι ικανή για την μέτρηση της συμπλασματικής τιμής του Ψ υπό τις περισσότερες συνθήκες. Η τεχνική είναι απλή, το φύλλο (ή το κλαδί) αποκόπτετε από το φυτό με μια αιχμηρή λεπίδα ξυραφιού εφόσον πρώτα τοποθετηθεί μέσα σε ένα σακουλάκι που σφραγίζει και αφήνει έξω μόνο τον μίσχο που αποκόπτεται. Αυτό γίνεται για χρονικό διάστημα 2 λεπτών έως ότου εξισορροπηθεί η ατμόσφαιρα στο σακουλάκι. Έπειτα τοποθετείται στον θάλαμο πίεσης με την επιφάνεια τομής του μίσχου (ή του κοτσανιού) να προεξέχει ελαφρώς ανάμεσα από μια λαστιχένια επισφραγισμένη τσιμούχα όπως φαίνεται στην εικόνα 38. Έπειτα η πίεση αυξάνεται βαθμιαία στον θάλαμο με την προσθήκη αζώτου ή αέρα από μια συσκευή πεπιεσμένου αέρα. Η πίεση αυξάνεται έως ότου εμφανιστεί αρχικά το νερό στην ξυλώδη επιφάνεια όπου είναι η τομή του μίσχου. Ο ακριβής προσδιορισμός αυτού του τελικού σημείου βοηθιέται με την χρήση ενός μικροσκοπίου ή ενός μεγεθυντικού φακού χειρός. Η ισορροπία της πίεσης στον θάλαμο σε αυτό το τελικό σημείο, παίρνετε ως αρνητική τιμή, είναι ίση με τη αποπλασματική τιμή του $\bar{\Psi}$ στο φύλλο, το οποίο είναι ίσο στη συνέχεια με τη συμπλασματική τιμή του Ψ στις περισσότερες συνθήκες.



Εικόνα 38. Πλάγια τομή του θαλάμου πίεσης όπου φαίνεται ο τρόπος τοποθέτησης του φύλλου μέσα σε αυτόν και η οπή όπου διαπερνάται ο μίσχος. (Plant moisture vessel SKPM 1400, SKYE INSTRUMENT LIMITED, UK)

11. ΕΛΕΓΧΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ ΠΙΕΣΤΙΚΟΥ ΘΑΛΑΜΟΥ

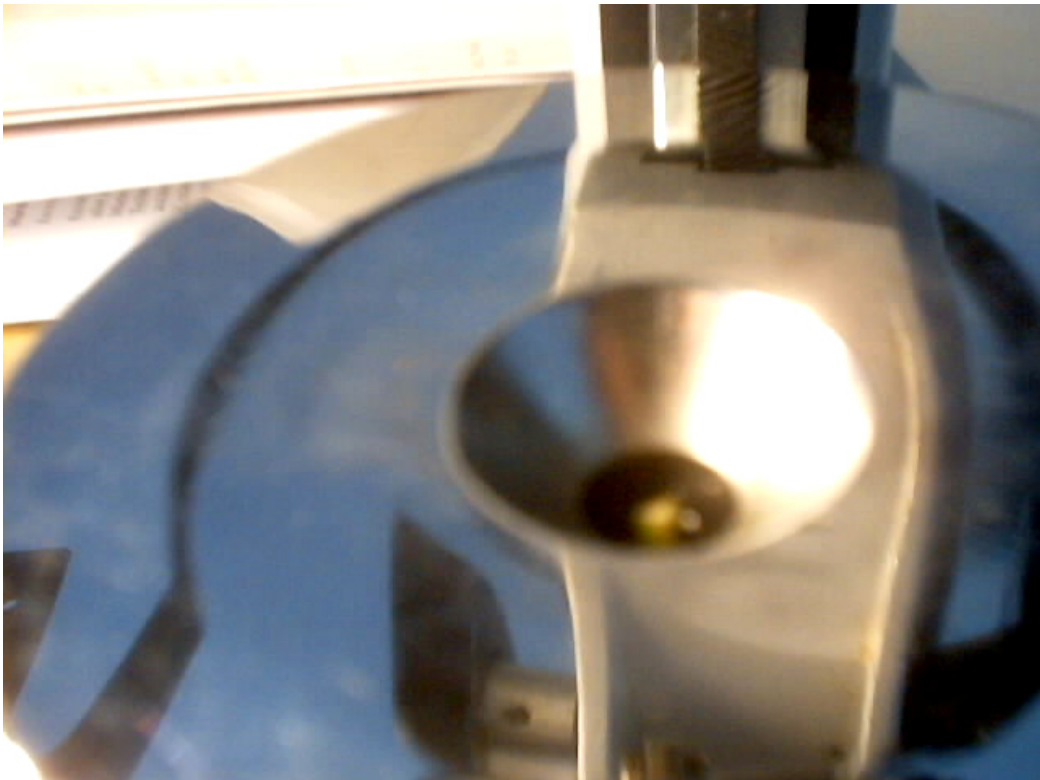
Οι έλεγχοι και οι συναρμολογήσεις για το όργανο είναι οι εξής:

1) Ο διακόπτης έλεγχου αερίου έχει τρεις θέσεις όπως δείχνεται στην εικόνα 39, α) "θάλαμο πλήρωσης β) "αερισμός θαλάμου" και γ) την θέση "κλειστό". Ελέγχει τη ροή του αερίου προς και από το δοχείο πίεσης. Στη θέση "πλήρωση" επιτρέπει τη ροή του αερίου από το γρήγορο κολπίσκο απελευθέρωσης μέσω της βαλβίδας ακίδας και της βαλβίδας ασφάλειας απελευθέρωσης πίεσεως στον θάλαμο. Στην θέση "αερισμός" επιτρέπει στο αέριο να διαφύγει από τον θάλαμο στο διάστημα κάτω από το ταμπλό. Η εισαγωγή αερίου είναι απομονωμένη σε αυτήν την θέση. Στη θέση "κλειστό" η αίθουσα είναι απομονωμένη.



Εικόνα 39. Φιάλη που περιέχει άζωτο υπό πίεση με της ρυθμιστικές βαλβίδες και τα μανόμετρα. (Από το πείραμα που πραγματοποιήσα)

2) Η βαλβίδα ακίδων ελέγχει το ποσοστό ροής αερίου στον θάλαμο όπως φαίνεται στην εικόνα 40. Σταματάει ουσιαστικά τη ροή του αερίου όταν βιδώνεται πλήρως. Προφανώς η ρύθμιση θα είναι διαφορετική εάν η τελική πίεση πρόκειται να είναι 35 bar αντί για 3 bar αλλά σε μια ποσότητα υλικού η βαλβίδα ακίδων μπορεί να αφηθεί σε μια καθορισμένη θέση, και η κύρια κάνουλα αερίου, όπου χρησιμοποιείται για να σταματήσει και να αρχίσει τη ροή. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η βαλβίδα δεν πρέπει να είναι πολύ σφιγμένη γιατί είναι δυνατό να παραμορφωθεί η "ακίδα" και να χαλάσει.



Εικόνα 40. Μέρος της βαλβίδας ακίδων. (Από το πείραμα που πραγματοποιήσα)

3) Ο σύνδεσμος γρήγορης απελευθέρωσης του αερίου εγκαθίσταται για να επιτρέψει στην αφαίρεση της εύκαμπτης μάνικας κατά τη μεταφορά.

4) Ο διακόπτης ON-OFF διακόπτει την ισχύ στα ηλεκτρονικά στοιχεία κυκλώματος. Πάντα χρησιμοποιήστε πίεση 0-20 bar δεδομένου ότι αυτό θα δώσει μια τιμή 0,01 bar. Εάν η άνοδος πίεσης στον θάλαμο προκαλεί ένδειξη πέρα από την κλίμακα επιλέξτε απλά μεταβείτε στη κλίμακα 0 - 200 bar.



Εικόνα 41. Παρουσίαση των κουμπιών και της οθόνης μέτρησης. (Από το πείραμα που πραγματοποιήσα)

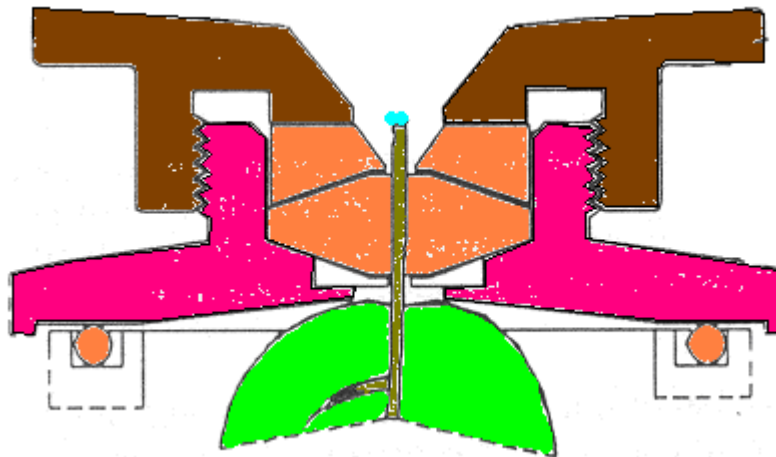
5) Η ένδειξη και τα κουμπιά παρέχονται όταν ο χειριστής δεν χρειάζεται να βλέπει την οθόνη την στιγμή που είναι στον προσδιορισμό του "τελικού σημείου" της δοκιμής όπως φαίνονται στην εικόνα 41. Όταν το κουμπί hold πιέζεται, η ένδειξη είναι παγωμένη έως ότου πιεστεί το κουμπί free. Η ένδειξη θα παρουσιάσει την τρέχουσα πίεση θαλάμου εάν έχει αλλάξει στο μεταξύ. Κατά συνέπεια ο χειριστής προσέχει μόνο το άκρο της κοπής του μίσχου και ωθεί το κουμπί λαβής όταν φαίνεται να προκύπτουν ρευστά από το τέλος της κοπής.

6) Η μονάδα χρησιμοποιεί μπαταρίες εννέα βολτ τύπου PP 3.

12. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ

Πρώτα ελέγχουμε και μηδενίζουμε τον μετατροπέα πίεσης. Ανάβουμε και θέτουμε τη κλίμακα στα 0-20 bar. Πιέζουμε το κουμπί "ελεύθερη ένδειξη". Η ένδειξη αμέσως θα πάει σε νέα τιμή έπειτα να τεθεί προσεκτικά στο μηδέν, ενώ θα εξασφαλίσουμε ότι η κλίμακα θα είναι στα 0-20bar και ότι η κύρια κάνουλα αερίου τίθεται στην θέση "αερισμός θαλάμου" ώστε ο θάλαμος να εξισορροπήσει με την ατμόσφαιρα. Το μηδέν πρέπει να τεθεί σε πιο ευαίσθητη κλίμακα (δηλ. 0-20bar) δεδομένου ότι αυτό θα δώσει το ακριβέστερο μηδέν στη λιγότερο ευαίσθητη κλίμακα. Πριν προχωρήσουμε σιγουρευόμαστε ότι η μεγάλη βαλβίδα αερίου τίθεται σε θέση "αερισμός θαλάμου".

Καθορίζουμε ένα λαστιχένιο δακτύλιο σφράγισης που είναι ίδιο μέγεθος ή ελαφρώς μεγαλύτερο από τους μίσχους των δειγμάτων που μετριοούνται. Εάν ο μίσχος είναι ξύλινος είναι καλύτερο να επιλεχτεί ένα λαστιχένιο σφράγισμα ώστε να κρατεί σφιχτό το δείγμα και να ταιριάζει στη βάση του καπακιού. Το σωστό είναι αυτός που έχει μια κεντρική οπή ακριβώς μεγαλύτερη από το λαστιχένιο δακτύλιο σφράγισης, έτσι ώστε να δίνει μέγιστη υποστήριξη στο λαστιχένιο δακτύλιο σφράγισης υπό πίεση αλλά να μην αγγίζει όμως το μίσχο του φυτού. Ο χαμηλότερος μεταλλικός δακτύλιος που σφραγίζει του μίσχους μειώνεται απλά στην κοιλότητα που παρουσιάζεται στην εικόνα 42.



Εικόνα 42. Όψη του τμήματος όπου διαπερνάται και σφραγίζεται ο μίσχος. (Plant moisture vessel SKPM 1400 SKYE INSTRUMENT LIMITED, UK)

Με τον ίδιο τρόπο επιλέγουμε ένα πλαστικό δακτύλιο σφράγισης μίσχων για να πάει στην κορυφή του λαστιχένιου δακτυλίου σφράγισης. Είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί το μέγεθος που είναι ακριβώς ένα χιλιοστό ή λίγο μεγαλύτερο από το λαστιχένιο δακτύλιο. Δίνουν καλύτερη συμπίεση του λάστιχου και αποτρέπουν επίσης την εξώθηση του λάστιχου από την πίεση μέσα στο δοχείο.

Συγκεντρώνουμε αυτά τα τρία στο καπάκι του δοχείου όπως φαίνεται στο διάγραμμα και καθαρίζουμε με προσοχή τις κοιλότητες και τους δακτυλίους ώστε να εξασφαλιστεί πρώτα μια αξιόπιστη σφράγιση. Τέλος βιδώνουμε καλά τα σπειρώματα του σφιγκτήρα σφράγισης μίσχων.

Παρεμβάλουμε το άκρο της κοπής του μίσχου από την κάτω μεριά του καπακιού έτσι ώστε να εμφανίζεται ακριβώς στη κεντρική οπή του σφιγκτήρα σφράγισης μίσχων και έπειτα σφίγγουμε το σφιγκτήρα. Η εμπειρία θα υπαγορεύσει το βαθμό συμπίεσης που απαιτείται για να λάβει μια ικανοποιητική σφράγιση με οποιοδήποτε δεδομένο υλικό, αλλά είναι πάντα δυνατό να αυξηθεί η πίεση σφράγισης με το να βιδώσει το σφιγκτήρα καλύτερα. Εξασφαλίζουμε ότι ο δακτύλιος "Ο" στη βάση του δοχείου είναι χωρίς ρύπο και ρωγμή και ότι το μεγάλο δακτυλίδι "Ο" είναι σωστά καθισμένο στο μέρος. Βιδώνουμε το καπάκι συναρμολόγησης επάνω στη βάση παίρνοντας προσοχή αν τα σπειρώματα δεσμεύουν σωστά. Δεν πιέζουμε τα σπειρώματα. Σφίγγουμε το επικεφαλής καπάκι σταθερά επάνω στη βάση δοχείου.

Πριν προχωρήσουμε να διατηρηθεί σταθερή η ατμοσφαιρική πίεση στο δοχείο, αποκόπτουμε τη perspex ασπίδα ασφάλειας σε μέρος στο καπάκι δοχείου, και βάζουμε τα γυαλιά ασφάλειας που παρέχονται το σύστημα. Είναι το σημαντικότερο να παρατηρηθούν αυτές οι προφυλάξεις δεδομένου ότι υπάρχει μια πιθανότητα της εκτίναξης του φυτικού ιστού από το δοχείο υπό πίεση εάν δεν εξασφαλίζεται επαρκώς η στεγανότητα.

Αφού γίνουν τα παραπάνω το δοχείο μπορεί να διατηρήσει σταθερή ατμοσφαιρική πίεση. Αρχικά εξασφαλίζουμε ότι ο ανεφοδιασμός αερίου είναι έτοιμος, αλλά είναι εντελώς κλειστός. Σιγουρευόμαστε ότι ο ρυθμιστής είναι σε θέση να παραδώσει τη μέγιστη πίεση που είναι πιθανό να απαιτηθεί, αλλά θυμόμαστε ότι η βαλβίδα απελευθέρωσης ασφάλειας τίθεται στα 40bar. Βεβαιωνόμαστε ότι η εύκαμπτη μάνικα ανεφοδιασμού είναι σε καλή κατάσταση και ότι οι συζεύξεις γρήγορης απελευθέρωσης σφραγίζουν σωστά.

Γυρίζουμε την κύρια κάνουλα αερίου από τη θέση "κλειστό" και στρέφουμε τη βαλβίδα ακίδων πλήρως δεξιόστροφα για να την κλείσουμε. Δεν την σφίγγουμε πολύ την βαλβίδα βελόνων δεδομένου ότι αυτό θα την βλάψει. Μόνο ελάχιστη συμπίεση απαιτείται. Συνδέουμε την εύκαμπτη μάνικα με τη μονάδα και ανοίγουμε τον ανεφοδιασμό αερίου στην φιάλη. Θέτουμε το ρυθμιστή (εάν είναι απαραίτητο) για να παραδώσουμε τη μέγιστη πίεση που είναι πιθανό να απαιτηθεί. Θέτουμε την "κλίμακα ένδειξης" στη κλίμακα για την κατάλληλη εργασία. Αν υπάρχει αμφιβολία χρησιμοποιούμε πάντα την πιο ευαίσθητη κλίμακα προκειμένου να πάρουμε την καλύτερη ανάλυση και η αλλαγή κυμαίνεται όταν η ένδειξη είναι υπεραρκετή. Το σύστημα δεν θα βλαφτεί από καμιά άποψη με το να κάνει αυτό. Εξασφαλίστε ότι η ένδειξη είναι ελεύθερη, αν υπάρχει αμφιβολία πιέζουμε το κουμπί 'ελεύθερης ένδειξης'.

Γυρίζουμε την κύρια μάνικα αερίου στη θέση "θάλαμος πλήρης" ανοίγουμε τη βαλβίδα ακίδων με μια περιστροφή. Ένας εξασθενημένος συριγμός μπορεί να ακουστεί καθώς ο θάλαμος γεμίζει. Παρατηρούμε άνοδο πίεσης στην ένδειξη, αλλά επικεντρωνόμαστε στο τέλος της κοπής του δείγματος. Κρατούμε με το ένα δάχτυλο το κουμπί "ένδειξη κράτησης". Το ποσοστό ανόδου πίεσης μπορεί να αυξηθεί εάν επιδιώξουμε να ανοίξουμε τη βαλβίδα ακίδων περαιτέρω. Όταν παρατηρηθεί το τελικό σημείο ωθούμε το κουμπί "κράτηση ένδειξης" και γυρνάμε έπειτα την κύρια κάνουλα αερίου στο "κλειστό".

Εάν πρέπει να επαναληφθεί η ανάγνωση, κατόπιν η πίεση στο δοχείο πρέπει να μειωθεί κάτω από το τελικό σημείο με τη περιστροφή της κύριας κάνουλας αερίου αργά στη θέση "διέξοδος θαλάμου". Είμαστε προσεκτικοί κάνοντας αυτό για το πρώτο φορά δεδομένου ότι το αέριο θα απελευθερωθεί πολύ γρήγορα κάτω από το ταμπλό με έναν ιδιαίτερο θόρυβο. Μόνο λίγο αέριο χρειάζεται να αεριστεί κατ' αυτό τον τρόπο για να κάνει μια ανάγνωση επανάληψης, και η μάνικα μπορεί πολύ σύντομα να τεθεί στο "κλειστό". Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί ξανά. Όταν τελειώσουν οι μετρήσεις ο θάλαμος πρέπει να επιστραφεί εντελώς στην ατμοσφαιρική πίεση προτού αφαιρεθεί το δείγμα. Για να ολοκληρωθεί αυτό η κύρια κάνουλα αερίου πρέπει να περιστραφεί αργά στη θέση "αερισμός θαλάμου" έως ότου ακουστεί η διαφυγή του αερίου. Αφήνουμε το σύστημα να αεριστεί αργά πρώτα και μην γυρίστε τη κάνουλα πλήρως στη θέση "αερισμός θαλάμου" έως ότου διαβάσει ο μετρητής πίεσης σχεδόν μηδέν. Όταν η πίεση απελευθερωθεί έπειτα το καπάκι μπορεί να ξεβιδωθεί και το δείγμα αντικαθιστάται.

Όταν τελειώσουν οι μετρήσεις και το όργανο πρόκειται να συσκευαστεί η πίεση στην εύκαμπτη μάνικα πρέπει να απελευθερωθεί τελείως. Προτού αφαιρεθεί το τελευταίο δείγμα ο ανεφοδιασμός αερίου πρέπει να γυρίσει στον κύλινδρο. Ο θάλαμος είναι γεμισμένος με το αέριο που αφήνεται στο σωλήνα και αερίζεται στη συνέχεια. Αυτό πρέπει να επαναληφθεί αρκετές φορές για να μειώσει την πίεση αρκετά. Μην προσπαθήσετε να αδειάσετε το σωλήνα με το αφαιρούμενο καπάκι θαλάμου δεδομένου ότι αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μικροσκοπικά μόρια του χαλκικού κ.λ.π., ώστε να εκτιναχθούν και να εισχωρήσουν με το φύσημα στα μάτια του χειριστή.

Η εύκαμπτη μάνικα μπορεί τώρα να αφαιρεθεί. Βεβαιωνόμαστε ότι σβήσαμε την μπαταρία και αποθηκεύουμε την φιάλη αερίου, το ρυθμιστή και τη μάνικα προσεκτικά.

Οι αναγνώσεις που λαμβάνονται από το όργανο είναι πιέσεις, που διαβάζονται σε μονάδες bar.

12.1 Προφυλάξεις που λαμβάνονται κατά την μέτρηση του Ψ με την τεχνική των πιεστικών-θαλάμων

1. Αμέσως μετά την κοπή του από το φυτό, το φύλλο πρέπει να εσωκλειστεί σε μια πλαστική θήκη (εκτός από τον μίσχο) για να αποτρέψει την απώλεια νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου μέτρησης. Η θήκη πρέπει να παραμείνει επάνω στο φύλλο μέσα στον θάλαμο πίεσης. Γρήγορα εφιδρώνουμε τα φύλλα, μετράμε τις σημαντικές μειώσεις στο Ψ μέσα στα πρώτα 10-30 δευτερόλεπτα μετά από την αποκοπή, και συνίσταται να κλείσουμε το φύλλο σε μια πλαστική θήκη 1-2 δευτερόλεπτα πριν από την αποκοπή. Το συνημμένο φύλλο δεν πρέπει να εσωκλειστεί στη θήκη για πολύ, περισσότερο από 1-2 δευτερόλεπτα, όποτε το Ψ μπορεί να αρχίσει να αυξάνεται.

2. Ο μίσχος δεν θα πρέπει να ξανακοπεί αφού το φύλλο έχει αποκοπεί από το φυτό. Όταν ο μίσχος κοπεί, το νερό στο ξύλημα, που είναι υπό τάση, θα υποχωρήσει σε μια μικρή απόσταση από την επιφάνεια κοπής. Το νερό θα υποχωρήσει έως ότου είναι ανίκανη η επαφή αέρος-νερού να περάσει μέσω των πόρων στα τελικά

τοιχώματα των ξυλωδών στοιχείων. Εφ' όσον έχει κοπεί ο μίσχος μόνο μία φορά, το νερό θα ξαναγεμίσει τα εκκενωμένα ξυλώδη στοιχεία όταν επιτυγχάνεται το τελικό σημείο στον θάλαμο πίεσης, με συνέπεια την καθαρή μετακίνηση νερού μέσα στον συμπλασματικό ιστό. Εάν ο μίσχος έχει κοπεί περισσότερο από μία φορά τότε, θα εμφανιστεί μια καθαρή μετακίνηση του νερού μέσα στο σύμπλασμα, το οποίο θα οδηγήσει σε μια λανθασμένη υψηλή μέτρηση του Ψ . Αυτό το λάθος θα είναι μέγιστο στα είδη με μεγάλα στοιχεία ξυλώδους και σε είδη που υπόκεινται στις χαμηλές τιμές του Ψ .

3. Το μήκος του μίσχου που προεξέχει από τον θάλαμο πίεσης πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, για να αποτραπεί η εξάτμιση από τον εκτεθειμένο μίσχο και την αποφυγή σφαλμάτων.

4. Η λαστιχένια επισφραγισμένη τσιμούχα πρέπει να εγκατασταθεί στενά γύρω από το μίσχο έτσι ώστε το αέριο να μην διαφύγει από τον θάλαμο πίεσης. Η ζημία στους πλώδεις μίσχους είναι αποτέλεσμα από την σύσφιξη της τσιμούχας που ελαχιστοποιείται με την χρήση μιας ρυθμιζόμενης τοξικής ρητίνης.

5. Το ποσοστό διατήρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης στον θάλαμο πρέπει να είναι πολύ αργό για να αποτρέψει την ανάπτυξη ανισορροπιών του Ψ μέσα στον συμπλασματικό ιστό. Συστήνεται ένα ποσοστό $0.003-0.005 \text{ MPa s}^{-1}$. Οι εσωτερικές ανισορροπίες του Ψ μπορούν να είναι ιδιαίτερα προβληματικές στα κλαδιά, τα σύνθετα φύλλα και στα μεγάλα έντονα φύλλα, μέσα στα οποία οι αντιστάσεις στη μεταφορά του νερού μπορούν να ποικίλουν σημαντικά από σημείο σε σημείο.

Ο βαθμός στον οποίο αυτές οι προφυλάξεις πρέπει να ακολουθούνται θα εξαρτηθεί στα είδη τα οποία ενδιαφερόμαστε να μελετήσουμε. Σε μερικά είδη, ο μίσχος μπορεί να έχει ανακοπεί αρκετές φορές χωρίς να έχει σημαντικές επιπτώσεις στη μετρούμενη αξία του Ψ . Επιπλέον, είναι δυνατό σε κάποια είδη να χρησιμοποιηθεί ένα γρήγορα μετρημένο αρχικό ποσοστό διατήρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης στον θάλαμο πίεσης, που ακολουθείται από ένα αργό ποσοστό διατήρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης κοντά στο τελικό σημείο. Η τελευταία μέθοδος επιτρέπει περισσότερα δείγματα φύλλων, και ως εκ τούτου υπάρχει ένας μεγαλύτερος αριθμός δειγμάτων μέσα στον πληθυσμό, για να υποβληθεί σε επεξεργασία σε μια μικρή χρονική περίοδο. Οι ερευνητικές μετρήσεις με κάθε νέο ενδιαφέρον είδος θα βοηθήσουν στον βέλτιστο καθορισμό των διαδικασιών που χρησιμοποιούνται.

Ακόμα και όταν ακολουθούνται αυστηρά αυτές οι προφυλάξεις, εντούτοις, η ευκολία με την οποία το Ψ μπορεί να μετρηθεί με την τεχνική των θαλάμων πίεσης μπορεί να ποικίλει από είδος σε είδος. Στα περισσότερα είδη, το τελικό σημείο κάλλιστα καθορίζεται, επιτρέποντας στο Ψ να μετρηθεί με έναν υψηλό βαθμό ακρίβειας. Σε μερικά είδη, εντούτοις, ο προσδιορισμός του τελικού σημείου περιπλέκεται από την έκκριση ρητίνης από τους αγωγούς στο ξύλημα ή τη ρευστή έκκριση από την ψίχα και το φλοιό.

Η αφαίρεση αυτών των εκκριμάτων από την κομμένη επιφάνεια με το επαναλαμβανόμενο λέκιασμα του μικρότερου χνουδιού ιστού κατά τη διάρκεια διατήρησης της ατμοσφαιρικής πίεσης του θαλάμου ή από τη συστολή του μίσχου, μπορεί να βοηθήσει τον προσδιορισμό του τελικού σημείου.

12.2 Τεχνικές για την μέτρηση των συμπλασματικών τιμών του $\bar{\pi}$ και \bar{P}

Οι τεχνικές πιεστικού θαλάμου και του ψυχομετρικού είναι επίσης οι κύριες μέθοδοι για την μέτρηση των συμπλασματικών τιμών του $\bar{\pi}$ και του \bar{P} στα ψηλά φυτά όπου αυξάνονται υπό αγροτικές συνθήκες. Η τεχνική των ελέγχων πίεσης, που επιτρέπει στο \bar{P} να μετρηθεί άμεσα στα κύτταρα των άθικτων ιστών, έχει προσαρμοστεί πρόσφατα επιτυχώς για τη χρήση στα μεσοφυτικά φυτά υπό τις ακριβώς ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες, ενώ με κατάλληλες τροποποιήσεις αυτή η τεχνική μπορεί τελικά να είναι κατάλληλη στη χρήση σε φυτά όπου αυξάνονται υπό αγροτικές συνθήκες.

13. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΠΙΕΣΤΙΚΩΝ ΘΑΛΑΜΩΝ

13.1 Τεχνική πιεστικού θαλάμου

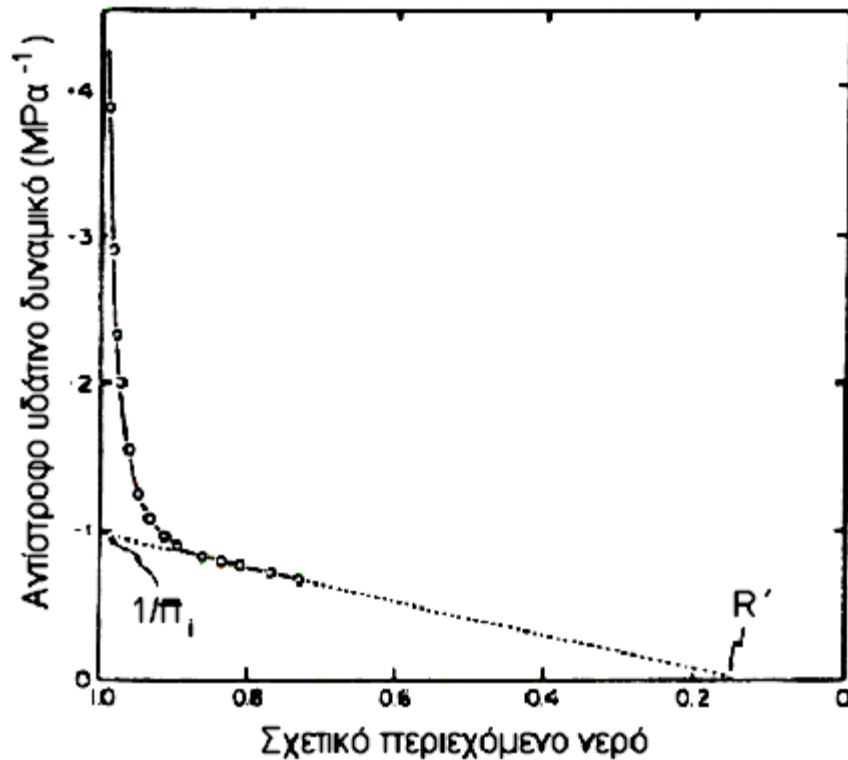
Η ευρύτατα χρησιμοποιημένη μέθοδος για μέτρηση των συμπλασματικών τιμών $\bar{\pi}$ και \bar{P} στους ζωντανούς άθικτους ιστούς είναι η τεχνική πιεστικού θαλάμου.

Η συμπλασματική τιμή του $\bar{\pi}$ προσεγγίζεται από:

$$\bar{\pi} = -\frac{\varphi\rho RTN}{W_s} \quad (6)$$

Στην εικόνα 43 το $1/\Psi = -7.41 \text{ MPa}^{-1}$ και το $R' = 0.997$. Η διακεκομμένη γραμμή καθορίζει την υπολογισμένη σχέση μεταξύ του αντίθετου οσμωτικού δυναμικού του ιστού ($1/\bar{\pi}$) και του R' .

Η παρεμπόδιση της διακεκομμένης γραμμής στον άξονα Y αποδίδεται στην αντίθεση του οσμωτικού δυναμικού του ιστού στην πλήρη ενυδάτωση του ($1/\bar{\pi}_i$). Η τιμή του $\bar{\pi}_i$ σε αυτό το παράδειγμα είναι $-1,02 \text{ MPa}$. Η παρεμπόδιση της διακεκομμένης γραμμής με τον άξονα X αποδίδεται στη σχετική περιεκτικότητα σε νερό του αποπλασματικού ιστού ($R'a$). Η τιμή του $R'a$ σε αυτό το παράδειγμα είναι $0,14$. Λαμβάνοντας υπόψη τη μετρημένη σχέση μεταξύ του $1/\Psi$ και του R' μαζί με την υπολογισμένη σχέση μεταξύ του $1/\bar{\pi}$ και του R' , είναι πιθανό να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ της πίεσης σπαργής των κύτταρων του ιστού (P) και του R' από την εξίσωση 4, από $P = \Psi - \bar{\pi}$. Επίσης είναι πιθανό να υπολογιστεί η σχέση μεταξύ της πίεσης σπαργής των κυττάρων του ιστού P και του δυναμικού νερού του ιστού Ψ με παρόμοιο τρόπο.



Εικόνα 43. Σχέση μεταξύ του αντίθετου δυναμικού νερού του ιστού ($1/\Psi$) και της σχετικής περιεκτικότητας σε νερό του ιστού (R'). (Plant water status, hydraulic resistance and capacitance, Roger Koide, Robert Robichaux, Suzanne Morse, Celia Smith)

Λαμβάνοντας υπόψη την υπολογισμένη σχέση μεταξύ $1/\bar{\pi}$ και R' , μαζί με τη μετρημένη σχέση μεταξύ $1/\Psi$ και R' , είναι επίσης δυνατό να υπολογιστούν οι σχέσεις μεταξύ \bar{P} και R' όπου χρησιμοποιείται η εξίσωση 4. Τα είδη (ή τα γένη) μπορούν να διαφέρουν εμφανώς στις χωρητικότητες τους για τη διατήρηση των υψηλών τιμών του \bar{P} μαζί με τις μειώσεις του R' και Ψ . Αυτές οι διαφορές στην χωρητικότητα συντήρησης της πίεσης σπαργής των κυττάρων, μπορούν να προκύψουν από δύο χωριστά φαινόμενα. Κατ' αρχάς, η μέγιστη τιμή του \bar{P} μπορεί να αυξηθεί, απεικονίζοντας μια μείωση στην τιμή του $\bar{\pi}$ στην πλήρη ενυδάτωση (π_i). Δεύτερον, το ποσοστό στο οποίο το \bar{P} ελαττώνεται με το μειωμένο R' (ή Ψ) μπορεί να μειωθεί. Η τελευταία αλλαγή απεικονίζει μια αύξηση στο βαθμό ελαστικότητας του ιστού.

Τα στοιχεία που λαμβάνονται με την τεχνική πιεστικών θαλάμων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσουν τις ημερήσιες αλλαγές του \bar{P} στα φυτά που αυξάνονται υπό αγροτικές συνθήκες. Για τους συγκρίσιμους ιστούς μετριόνται οι ημερήσιες αλλαγές στο Ψ σύμφωνα με τις παραπάνω διαδικασίες. Λαμβάνοντας υπόψη την υπόθεση ότι η τελευταία σχέση δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας, μπορούμε έπειτα να υπολογίσουμε τις ημερήσιες αλλαγές στο \bar{P} . Υπογραμμίζουμε ότι η υπόθεση από την ημερήσια σταθερή σχέση μεταξύ \bar{P} και Ψ μπορεί να μην ισχύει πάντα, ιδιαίτερα για τα ποώδη είδη και για τα είδη που αυξάνονται υπό συνθήκες χαμηλού διαθέσιμου νερού.

Τρεις διαδικασίες είναι διαθέσιμες για την παραγωγή της σχέσης που διευκρινίζεται στην εικόνα 43. Και στις τρεις διαδικασίες, ένα φύλλο (ή κλαδί) συλλέγεται από έναν αγρό, το σφραγίζουμε αεροστεγώς σε μια πλαστική τσάντα και το μεταφέρουμε στο εργαστήριο, όπου ο αποκομμένος μίσχος ή το κοτσάνι είναι μέσα στο νερό για να αποβάλει τον αέρα από το ξύλημα. Εάν η αρχική αποκοπή μπορεί να εφαρμοστεί κάτω από νερό όταν συγκομίζεται το φύλλο, δεν υπάρχει καμία ανάγκη να αποκοπεί ο μίσχος. Προσοχή πρέπει να ληφθεί στην κατάσταση του φύλλου και περισσότερο το μέρος του μίσχου όπου πιθανόν να ξηραθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Αυτό ελαχιστοποιεί τη δυνατότητα για σφάλματα όπου συνδέονται με την απώλεια μη-συμπλασματικού νερού. Το φύλλο επιτρέπεται να ξαναυδατωθεί κατά την αποθήκευση του σε ένα δροσερό σκοτεινό υγρό θάλαμο με την άκρη του μίσχου του να καταδύεται σε αποσταγμένο νερό. Κατά γενικό κανόνα, η ενυδάτωση δεν πρέπει να επεκταθεί πολύ πέρα από το σημείο στο οποίο το Ψ προσεγγίζει το μηδέν. Αυτό ελαχιστοποιεί τη δυνατότητα για σφάλματα που συνδέονται με τις μεταβολικές αλλαγές μέσα στο φύλλο. Μόλις ξαναυδατωθεί πλήρως το φύλλο, το κορεσμένο βάρος του μετριέται, κατά προτίμηση με μια διακύμανση που είναι ακρίβεια κατά 0,1 ή 1 mg. Πριν την μέτρηση του κορεσμένου βάρους, είναι ενδεδειγμένο να αποκοπεί ο μίσχος επάνω από το επίπεδο στο οποίο καταδύθηκε κατά τη διάρκεια ενυδάτωσης. Αυτό ελαχιστοποιεί περαιτέρω τη δυνατότητα για σφάλματα που συνδέονται με την απώλεια μη συμπλασματικού νερού. Μετά από το προσδιορισμό του κορεσμένου βάρους, η αρχική τιμή του Ψ μετριέται με τον πιεστικό θάλαμο. Αυτή η αρχική τιμή του Ψ πρέπει να είναι υψηλότερη από -0,1 MPa εάν το φύλλο έχει επαναυδατωθεί πλήρως.

Σε αυτό το σημείο, οι τρεις διαδικασίες αποκλίνουν. Στην πρώτη διαδικασία, το φύλλο επιτρέπεται να ξεραθεί υπό τις περιβαλλοντικές συνθήκες στον εργαστηριακό πάγκο. Σε περιοδικά διαστήματα, μετριοούνται το καθαρό βάρος και το δυναμικό ύδατος του φύλλου. Για κάθε μέτρηση του Ψ , λαμβάνονται δύο μετρήσεις καθαρού βάρους, μια αμέσως πριν και μια αμέσως μετά από τον προσδιορισμό του Ψ . Ο μέσος όρος αυτών των δύο μετρήσεων του καθαρού βάρους χρησιμοποιείται στον επόμενο υπολογισμό του R' . Ο γρήγορος ρυθμός απελευθέρωσης θα οδηγήσει σε μια γρήγορη πτώση στη θερμοκρασία του φύλλου, η οποία μπορεί να προκαλέσει συμπύκνωση στην επιφάνεια του φύλλου, ζημιά στις μεμβράνες του φύλλου ή ακόμα και το πάγωμα του φύλλου.

Στη δεύτερη διαδικασία, το φύλλο χάνει το νερό από την διατηρούμενη πίεση στον πιεστικό θάλαμο, παρά από την εξάτμιση του στον εργαστηριακό πάγκο. Αφότου λαμβάνονται το κορεσμένο βάρος και η αρχική αξία Ψ , το φύλλο εκτίθεται σε μια πίεση 0.2-0.3 MPa παραπάνω από την αρχική πίεση ισορροπίας. Αυτό πέρα από την σταθερή πίεση αναγκάζει το νερό να διαφύγει από το φύλλο γρηγορότερα από ότι θα χανόταν από την εξάτμιση. Κατά συνέπεια οι ταξινομημένες κατά ζεύγος μετρήσεις του καθαρού βάρους και Ψ λαμβάνονται σε περιοδικά διαστήματα καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα σε νερό των φύλλων.

Στην τρίτη διαδικασία, το φύλλο χάνει επίσης το νερό από την διατήρηση της πίεσης στον πιεστικό θάλαμο. Σε αυτήν την περίπτωση, εντούτοις, το εξαγόμενο νερό συλλέγεται και ζυγίζεται, ενώ το φύλλο παραμένει εσωκλειόμενο στον πιεστικό θάλαμο. Αφού ληφθεί το κορεσμένο βάρος και η αρχική τιμή Ψ , το φύλλο εκτίθεται σε μια πίεση 0.2-0.3 MPa παραπάνω από την αρχική πίεση ισορροπίας για 10 λεπτά, κατά τη διάρκεια των οποίων το εξαγόμενο νερό συλλέγεται σε ένα λυγισμένο τμήμα της πλαστικής σωλήνωσης όπου γεμίζει με τον ξηρό ιστό. Μετά από 10 λεπτά, η σωλήνωση αφαιρείται και ζυγίζεται γρήγορα. Το βάρος του εξαγόμενου νερού αφαιρείται από το βάρος του κορεσμένου φύλλου και λαμβάνεται το καθαρό βάρος του φύλλου. Η πίεση στον θάλαμο χαμηλώνεται από 0.2-0.3 MPa για περίπου 15 λεπτά, και μετά μετρείται μια νέα τιμή του Ψ . Η νέα τιμή Ψ θα εξαρτηθεί από το πλεόνασμα νερού που χάνεται κατά τη διάρκεια της προηγούμενης διατηρήσεως περιόδου πίεσης. Μετά από το νέο προσδιορισμό του Ψ , το φύλλο εκτίθεται σε μια άλλη περίοδο διατηρήσεως πίεσης, και ο κύκλος μέτρησης επαναλαμβάνεται.

Και στις τρεις διαδικασίες, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται έως ότου έχει μειωθεί η περιεκτικότητα σε νερό του φύλλου στο 55-65% της αρχικής κορεσμένης τιμής του. Το φύλλο έπειτα ξηραίνεται σε έναν ξυριαντήριο στους 70-80 °C για 18-24 ώρες. Για κάθε μέτρηση Ψ, η τιμή του αντίστοιχου R' υπολογίζεται από:

$$R' = \frac{\text{φρέσκο βάρος} - \text{ξηρό βάρος}}{\text{κορεσμένο βάρος} - \text{ξηρό βάρος}} \quad (7)$$

Η εξίσωση του $1/\Psi$ ως προς το R' παράγει τη σχέση που διευκρινίζεται στην εικόνα 43. Η περιοχή πέρα από την οποία αυτή η σχέση είναι γραμμική μπορεί να καθοριστεί γραφικά με την ενίσχυση ενός σταδιακού προγράμματος γραμμικής μεταβολής. Όταν τα δεδομένα εκθέτουν περισσότερη διασπορά από αυτή που παρουσιάζεται στην εικόνα 43, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιπλοκότερες αναλυτικές μέθοδοι για να καθορίσουν τη γραμμική περιοχή. Οι τρεις διαδικασίες προσφέρουν διαφορετικά πρακτικά πλεονεκτήματα. Η πρώτη διαδικασία προσφέρει το σημαντικότερο πλεονέκτημα ότι έξι έως επτά δείγματα φύλλων μπορούν να υποβληθούν ταυτόχρονα σε επεξεργασία με μια μεμονωμένη εργασία σε έναν πιεστικό θάλαμο. Στην δεύτερη και τρίτη διαδικασία, αντίθετα, απαιτούνται διάφοροι πιεστικοί θάλαμοι για τα πολλαπλάσια δείγματα επεξεργασίας, δεδομένου ότι ο πιεστικός θάλαμος πίεσης χρησιμοποιείται και για την εξαγωγή του νερού από το φύλλο και για τη μέτρηση του Ψ. Οι τελευταίες διαδικασίες, εντούτοις, προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι γίνονται γρηγορότερα σε πολλές περιπτώσεις.

Σε γενικές γραμμές, οι τρεις διαδικασίες πρέπει να παράγουν το ίδιο αποτέλεσμα αλλά αυτό μπορεί να μην ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Για εκείνες τις περιπτώσεις στις οποίες επιτυγχάνονται διαφορετικά αποτελέσματα, δεν υπάρχει αυτήν την περίοδο καμία συναίνεση ως προς ποία διαδικασία παράγει το ακριβέστερο αποτέλεσμα.

Ανεξάρτητα από τη χρησιμοποιούμενη διαδικασία, η τεχνική πιεστικού θαλάμου έχει τέσσερις σημαντικές υποθέσεις. Αυτές είναι:

- (1) η συμπλασματική τιμή του Ψ μετριέται ακριβέστερα στον πιεστικό θάλαμο
- (2) οι αρνητικές τιμές του \bar{P} δεν εμφανίζονται στο συμπλάστη (δηλ. $\bar{P} > 0$),
- (3) η καθαρή απώλεια νερού από τον ιστό είναι εξ ολοκλήρου από το συμπλάστη (δηλ. $W_a = \text{σταθερά} = w_a^o$),
- (4) όταν χάνεται το νερό από το συμπλάστη, η συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών αυξάνεται κατά τρόπο ιδανικό (δηλ. $\Phi = \text{σταθερό}$)

Η τεχνική των πιεστικών θαλάμων υπόκειται επίσης σε διάφορες άλλες πιθανές πηγές σφαλμάτων. Αυτές περιλαμβάνουν:

- (1) βαθμιαίες αλλαγές στο $\bar{\pi}$ κατά τη χρονική διάρκεια των μετρήσεων,
- (2) πλαστική παραμόρφωση των κυτταρικών τοιχωμάτων κατά τη χρονική διάρκεια των μετρήσεων,
- (3) συστηματικό και τυχαίο σφάλμα στη μέτρηση του Ψ ,
- (4) εσωτερικές ανισοροπίες του Ψ .

Οι εσωτερικές ανισοροπίες του Ψ μπορούν να είναι ιδιαίτερα προβληματικές στα κλαδιά, τα σύνθετα φύλλα και στα διάφορα τονισμένα μεγάλα φύλλα.

13.2 Ψυχομετρικές τεχνικές

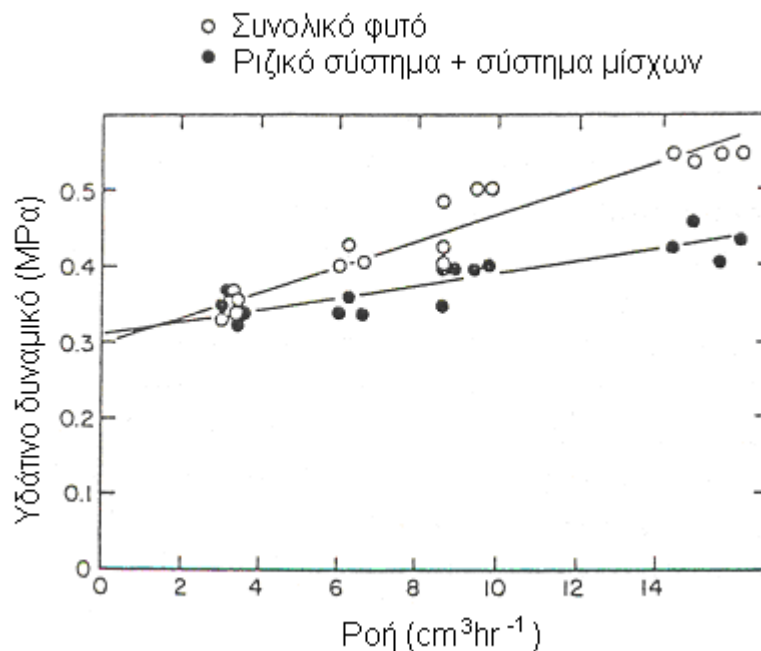
Διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούν ψυχομετρικά θερμοηλεκτρικά ζεύγη είναι επίσης διαθέσιμες για τη μέτρηση των συμπλασματικών τιμών του $\bar{\pi}$ και \bar{P} . Η τιμή του Ψ σε ένα δείγμα ιστού μετριέται αρχικά με το ψυχρόμετρο. Ο χυμός εξάγεται έπειτα από το δείγμα με μια μικρή πρέσα. Το δείγμα μπορεί να πιεστεί είτε στη νέα κατάσταση του ή να καταψυχθεί και ύστερα να ξεπαγωθεί. Οι τελευταία διαδικασία ενισχύει στην διάσπαση των μεμβρανών. Το απόσταγμα χυμού έπειτα, τοποθετείται αμέσως σε έναν δίσκο χάρτινων φίλτρων στο ψυχομετρικό θάλαμο και καθορίζεται η τιμή του π .

Με αυτές τις τεχνικές, οι συμπλασματικές τιμές του $\bar{\pi}$ και \bar{P} μπορούν να μετρηθούν γρηγορότερα απ' ό,τι με την τεχνική των πιεστικών θαλάμων. Οι ψυχομετρικές τεχνικές υπόκεινται σε μια σημαντική πηγή σφάλματος, δεδομένου ότι το συμπλασματικό νερό αραιώνεται με αποπλασματικό νερό μετά από τη διάσπαση των μεμβρανών κατά τη συμπίεση ή το πάγωμα. Ως εκ τούτου, η συμπλασματική τιμή του $\bar{\pi}$ μπορεί να υπερεκτιμηθεί σημαντικά με αυτές τις τεχνικές, με συνέπεια τις λανθασμένα χαμηλές εκτιμήσεις του \bar{P} . Επιπλέον, η ανταλλαγή ιόντων μεταξύ των συμπλασματικών ιόντων και των περιοχών ανταλλαγής στο κυτταρικό τοίχωμα μετά από τη διάσπαση μεμβρανών μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβείς εκτιμήσεις του \bar{P} και $\bar{\pi}$.

13.3 Υδραυλική αντίσταση και χωρητικότητα

Ακόμη και από ανυπαρξία εδαφικών ελλειμμάτων νερού, οι ημερήσιες μειώσεις του δυναμικού νερού των βλαστών έχει ως συνέπεια την απώλεια νερού στην διαπνοή. Η αιτία αυτών των μειώσεων του δυναμικού του νερού των βλαστών είναι η αντίσταση στην ροή του νερού (υδραυλική αντίσταση) στην πορεία από το έδαφος προς το φυτό. Η αυξανόμενη υδραυλική αντίσταση των φυτών έχει αποδειχθεί ότι είναι μηχανισμός από τον οποίο κάποιοι παθογενείς μύκητες προκαλούν τον μαρασμό. Η μέτρηση της υδραυλικής αντίστασης των φυτών έχει χρησιμοποιηθεί επίσης για να αξιολογήσει τη λειτουργική σημασία των τύπων ξυλημάτων και να βοηθήσει την αξιολόγηση των παραγόντων που περιορίζουν τη λήψη νερού στα φυτά. Η υδραυλική αντίσταση μπορεί επίσης να διαδραματίσει έναν ρόλο στον προσδιορισμό του βιότοπου, ειδικά σε σχέση με την συμπεριφορά των στομάτων. Διαπιστώθηκε ότι ο συνδυασμός υψηλής υδραυλικής αντίστασης και χαμηλής στοματικής ανταπόκρισης στην υγρασία είναι ενδεχομένως αρμόδια για τον περιορισμό του φυτού *Ribes uva-crispa* σε σκιασμένα περιβάλλοντα. Όταν τα φύλλα εκτεθούν σε υψηλά επίπεδα φωτισμού, η αποξήρανση πραγματοποιείται γρήγορα. Το έδαφος και τα φυτά συμβάλλουν στη γενική αντίσταση της διατηδούσας πορείας.

Σε πολλές περιπτώσεις, η γραμμική σχέση μεταξύ του δυναμικού νερού $\Delta\Psi$ και της σταθερής ροής του νερού, F , είναι εμφανείς, ιδιαίτερα στις μέτριες έως υψηλές ροές. Οι τιμές του ριζικού συστήματος συν το σύστημα των μίσχων R_h έχουν υπολογιστεί με αυτό τον τρόπο για έναν άθικτο ηλιάνθο όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 44. Η ροή μετρήθηκε βαρομετρικά ενώ το έδαφος κρατήθηκε υγρό και υποτίθεται ότι ήταν $\Psi = 0$ MPa κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Για το συνολικό φυτό, το $\Delta\Psi$ υπολογίστηκε από το έδαφος στο επιδρωμένο φύλλο. Το Ψ του φύλλου μετρήθηκε με πιεστικό θάλαμο. Η εξίσωση για τη γραμμική εμπειρική σχέση μεταβλητών είναι $\Delta\Psi = 0.0171 (F) + 0.297$. Για το ριζικό σύστημα συν το σύστημα των μίσχων, το $\Delta\Psi$ υπολογίστηκε από το έδαφος στο μίσχο. Το Ψ του μίσχου μετρήθηκε χρησιμοποιώντας την κάλυψη (χωρίς διαπνοή) του πλήρως-επεκταμένου φύλλου. Η εξίσωση για τη γραμμική εμπειρική σχέση είναι: $\Delta\Psi = 0.0079 (F) + 0,313$.



Εικόνα 44. Σχέσεις μεταξύ της μεταβολής του δυναμικού νερού ($\Delta\Psi$) και της σταθερής ροής νερού (F) σε ηλιάνθους ηλικίας 8-εβδομάδων που αυξάνονται στο έδαφος μέσα σε δοχεία. (Plant water status, hydraulic resistance and capacitance, Roger Koide, Robert Robichaux, Suzanne Morse, Celia Smith)

14. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

14.1 Θέση και οργάνωση του πειράματος

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε αγρόκτημα στο χώρο του Πανεπιστημίου Πατρών (θέση: γεωγραφικό πλάτος: 38° 25' Β, γεωγραφικό μήκος: 21° 8' Α) την περίοδο του καλοκαιριού του 2004. Το πείραμα περιλάμβανε την ανάπτυξη φυτών μέσα σε γλάστρες με διαστάσεις 40 cm στην διάμετρο κορυφής, 30 cm στην διάμετρο βάσης και ύψος 40 cm. Σε όλες τις γλάστρες εφαρμόστηκε πλήρη άρδευση. Σε κάθε γλάστρα τοποθετήθηκε υποδοχή για να εισχωρεί το αισθητήριο όργανο για τις μετρήσεις της εδαφικής υγρασίας όπως φαίνεται στην εικόνα 47 και να εφαρμόζεται η αντίστοιχη άρδευση. Στις εικόνες 45 και 46 φαίνεται το σχέδιο τοποθέτησης των γλαστρών σε φωτογραφικό υλικό από την καλλιέργεια του γλυκού σόργου κατά την καλλιεργητική περίοδο το καλοκαίρι του 2004 .



Εικόνα 45. Η προετοιμασία των γλαστρών πριν την σπορά του γλυκού Σόργου ποικιλίας Keller [*Sorghum bicolor* (L.) Moench, cv. Keller].



Εικόνα 46. Τα φυτά γλυκού Σόργου ποικιλίας Keller [*Sorghum bicolor* (L.) Moench, cv. Keller] σε ανάπτυξη.

14.2 Εδαφολογική σύσταση του εδάφους των γλαστρών

Από την κοκκομετρική ανάλυση σε δείγματα εδάφους κατά την περίοδο του πειράματος διαπιστώθηκε η εξής σύσταση κατά μέσο όρο: Άργιλος 23%, Άμμος 48.0% και Ιλύς 29.0%. Από τη χημική ανάλυση που έγινε στα ίδια δείγματα, για τον προσδιορισμό ορισμένων θρεπτικών στοιχείων και φυσικοχημικών χαρακτηριστικών, διαπιστώθηκαν τα εξής: Το pH των δειγμάτων εδάφους κυμάνθηκε μεταξύ 7,7-7,8, ο αφομοιώσιμος φώσφορος (κατά Olsen) 3-5 ppm, το ολικό ανθρακικό ασβέστιο 4-5%. Αντιστοίχως οι ανταλλάξιμες βάσεις κυμάνθηκαν ως εξής: Ασβέστιο 23-24,41 meq/100gr εδάφους, Μαγνήσιο 1,13 meq/100gr εδάφους, Κάλιο 0,4-0,5 meq/100gr εδάφους, Νάτριο 0,17 meq/100gr εδάφους. Ο υδατοκορεσμός (SP) των δειγμάτων κυμάνθηκε μεταξύ 37- 40%. Η οργανική ουσία που μετρήθηκε κατά την έναρξη του πειράματος την περίοδο 2003-2004 βρέθηκε να είναι στα δείγματα εδάφους κατά μέσο όρο 1.1%

14.3 Περιγραφή καλλιεργητικών τεχνικών

Το πείραμα άρχισε στις 15/07/2004 (ημερολογιακή ημέρα 197) με την τοποθέτηση του εδάφους στις γλάστρες και την σπορά των σπόρων γλυκού σόργου ποικιλίας Keller [*Sorghum bicolor* (L.) Moench, cv. Keller].

Η ανάδυση των πρώτων φυτών έγινε στις 17/07/2004 (ημερολογιακή ημέρα 199), ενώ η ανάδυση όλων των φυτών ολοκληρώθηκε κατά της 22/07/2004 (ημερολογιακή ημέρα 204).

Μια εβδομάδα μετά προστέθηκε λίπασμα υπό την μορφή (15-15-17) στα φυτά για την σωστή ανάπτυξη τους στις γλάστρες (ημερολογιακή ημέρα 213)

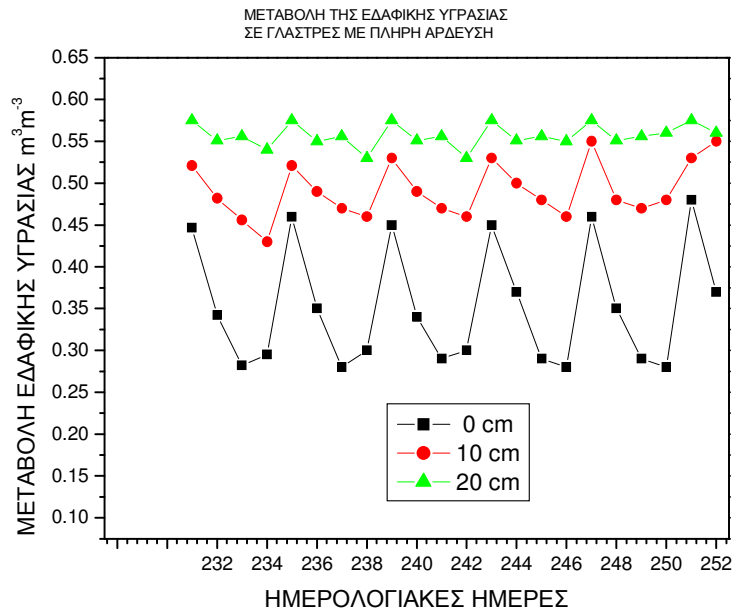
14.4 Η άρδευση των φυτών στις γλάστρες

Συνολικά από την εγκατάσταση των σπόρων στις γλάστρες μέχρι και το τέλος του πειράματος στα τέλη Σεπτεμβρίου 2004 (ημερολογιακή ημέρα 274) έγιναν διαδοχικές αρδεύσεις. Το εύρος άρδευσης ποικίλει ανάλογα με την εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Ο χρονικός καθορισμός του προσδιορίζονταν με τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας (E.Y.), με ένα ζεύγος αισθητήρων (εικόνα 47) που είχαν τοποθετηθεί στις γλάστρες και λαμβάνονταν μετρήσεις εδαφικής υγρασίας ανά 10 cm παίρνοντας ως επίπεδο αναφοράς τα 0,20m από την επιφάνεια εδάφους της γλάστρας. Στην αρχή της περιόδου οι γλάστρες αρδεύονταν με πλήρες νερό μέχρι το έδαφος να φθάνει στην υδατοικανότητά του. Όταν τα φυτά έφθασαν σε ένα ύψος από μισό έως ένα μέτρο τα χωρίσαμε σε δυο ομάδες των 10 γλαστρών. Η πρώτη ομάδα θα αρδεύονταν με πλήρες νερό και στην δεύτερη ομάδα θα στερούσαμε την άρδευση μέχρι το έδαφος να φθάσει κοντά στο σημείο μόνιμης μάρανσης όπως φαίνεται στην εικόνα 46. Αυτό επαναλήφθηκε αρκετές φορές μέχρι τα φυτά να στρεσαριστούν και να κάνουν οσμορύθμιση. Έπειτα από τρεις επαναλήψεις συγκράτησης της άρδευσης στην δεύτερη ομάδα γλαστρών, μετά τις αρδεύαμε και πάλι κανονικά μέχρι το σημείο της υδατοικανότητας και επαναλαμβανόταν το στρεσάρισμα των φυτών ως προς το νερό άρδευσης. Αυτό έγινε για τρεις συνεχόμενες φορές ώστε να επιτύχουμε την οσμορύθμιση των φυτών. Μετά την τελευταία άρδευση, μετρούσαμε την εδαφική υγρασία καθημερινά και στις δυο ομάδες γλαστρών και βλέπαμε την διακύμανση της.

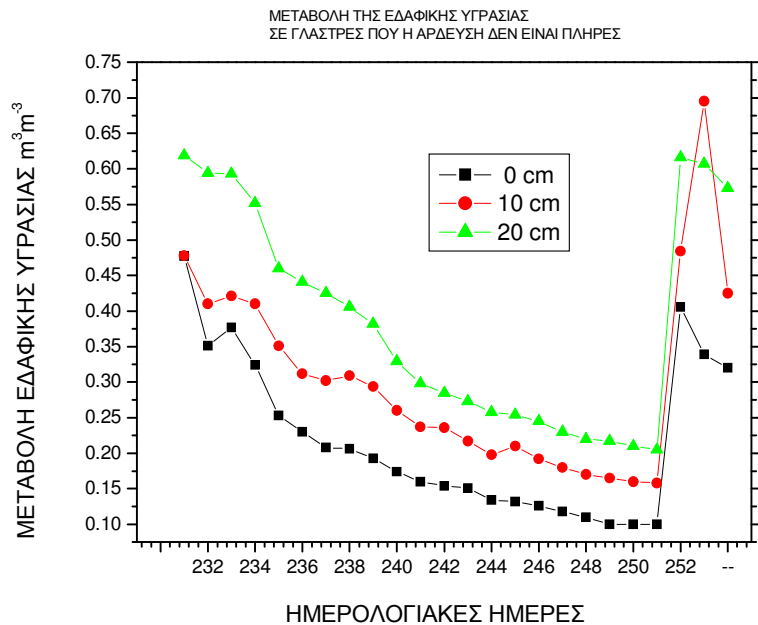
Παίρναμε φύλλα από τα φυτά που αρδεύονταν πλήρως και μετρήσαμε το δυναμικό νερού στο φύλλο ενώ αυτό γινόταν παράλληλα και για τα φυτά που υποβάλλονταν σε καταπόνηση νερού. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων η πρώτη ομάδα των 10 δοχείων συνέχισε να λαμβάνει καθημερινά άρδευση προκειμένου να διατηρηθεί υψηλή η διαθεσιμότητα του νερού στο έδαφος, ενώ στη δεύτερη ομάδα η άρδευση σταμάτησε (καταπόνηση). Εκείνη την περίοδο τα φυτά άρχισαν να παρουσιάζουν οπτικά σημάδια ανεπάρκειας νερού. Η μεταβολή της εδαφικής υγρασίας για την περίοδο των μετρήσεων φαίνεται στις εικόνες 48 και 49. Η εδαφική υγρασία που λαμβάνουμε υπόψιν στις μετρήσεις μας είναι των 20 cm γιατί εκεί θεωρούμε ότι βρίσκεται όλο το ενεργό ριζόστρωμα.



Εικόνα 47. Αισθητήρας για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας. (Από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών).



Εικόνα 48. Μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε γλάστρα που αρδεύεται πλήρως.



Εικόνα 49. Μεταβολή της εδαφικής υγρασίας σε γλάστρα που αρδεύεται ελεγχόμενα.

Η περίοδο των μετρήσεων άρχισε στις 18/08/04 (ημερολογιακή ημέρα 231) με την κοπή φύλλων για την μέτρηση του δυναμικού των φύλλων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής. Τα φύλλα κόπηκαν μέσα σε ένα δοχείο με νερό και παραμένουν εκεί περίπου για τρεις ώρες ώστε να ενυδατωθούν πλήρως και έπειτα αφού τοποθετήθηκαν σε ένα σακουλάκι και ζυγίστηκαν εισέρχονταν στον θάλαμο πίεσης. Η ίδια διαδικασία έγινε και για τα φυτά της δεύτερης ομάδας τα οποία υποβάλλονται σε καταπόνηση νερού. Η μεταβολή της πίεσης στον θάλαμο πίεσης γινόταν σταδιακά και σιγά σιγά. Το δυναμικό νερού κάθε φύλλου όταν τέθηκε αρχικά στον θάλαμο πίεσης ήταν μεταξύ -0.015 και -0.03 MPa. Η πίεση στον θάλαμο αυξήθηκε με βήματα και σταδιακά από την πίεση ισορροπίας. Μετά από 4 έως 10 λεπτά από την διατήρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης, η πίεση απελευθερώθηκε αργά από τον θάλαμο, το φύλλο αφαιρέθηκε και μετρήθηκε το καθαρό βάρος του. Το φύλλο επαναεισήχθη έπειτα στον θάλαμο πίεσης και μετρήθηκε η αντίστοιχη τιμή Ψ.

Το ξηρό βάρος των φύλλων καθορίστηκε μετά από την ξήρανση σε ένα ξυριαντήριο κυκλοφορούμενου αέρα στους 80 ° C για 24 ώρες. Χρησιμοποιώντας τον τύπο $RWC = [(FW - DW) \times (TW - DW)] \times 100$ βρίσκουμε την μεταβολή του RWC και την μεταβολή του $1/\Psi$, ώστε δημιουργήσαμε τα διαγράμματα της μεταβολής τους στα καταπονημένα φύλλα και στα μη καταπονημένα.

Από τα φύλλα που μετρήθηκαν πήραμε δύο από τα καταπονημένα και δυο από τα μη καταπονημένα.

- Τα αποτελέσματα για τα καταπονημένα φυτά είναι:

ΦΥΛΛΟ 11

RWC:=0.502

ΨΠ=1.126

Π0=0.61

ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ Π100=1.290

ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ Π0=0.655

Οι καμπύλες φαίνονται στην εικόνα 50

ΦΥΛΛΟ 12

RWC:=0.369

ΨΠ=1.455

Π0=0.7

- Τα αποτελέσματα για τα μη καταπονημένα είναι:

ΦΥΛΛΟ 6

RWC:=0.329

ΨΠ100=0.942

Π0=0.86

ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΨΠ100=0.981

ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ Π100=0.815

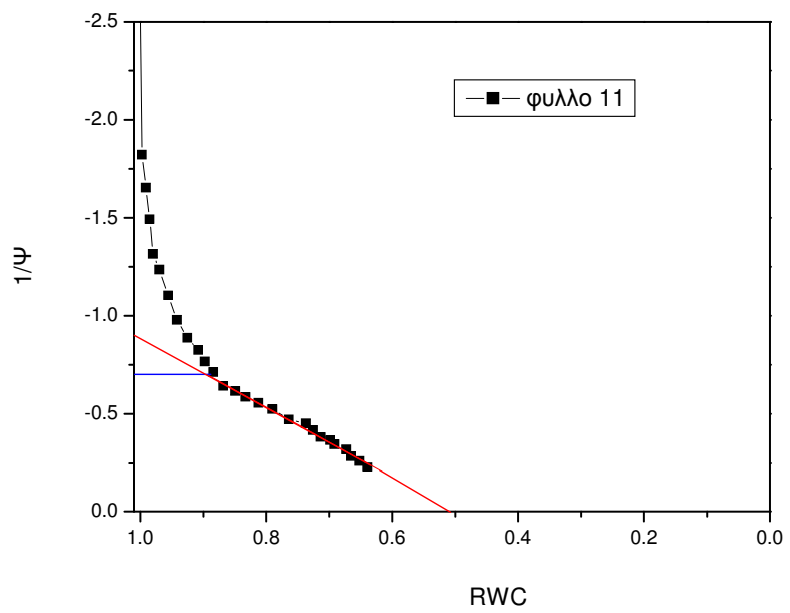
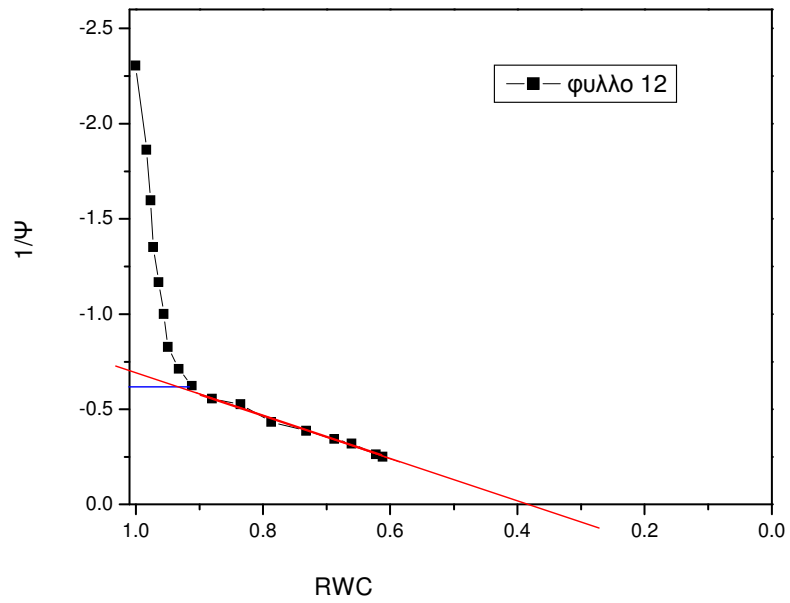
Οι καμπύλες φαίνονται στην εικόνα 51

ΦΥΛΛΟ 13

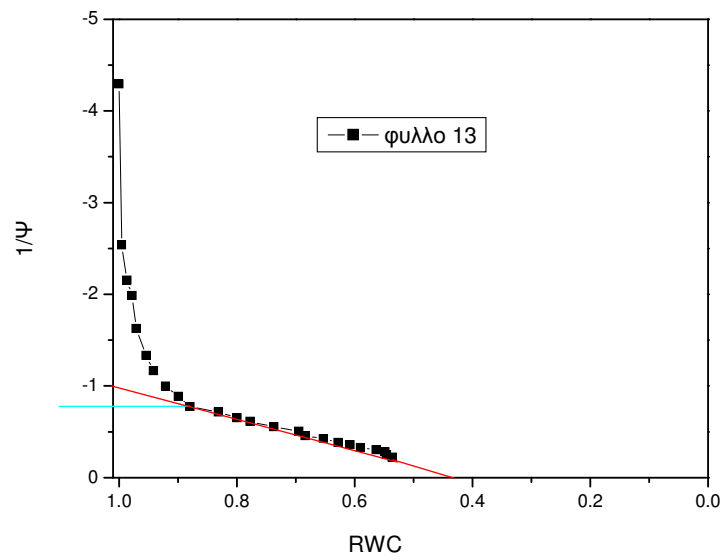
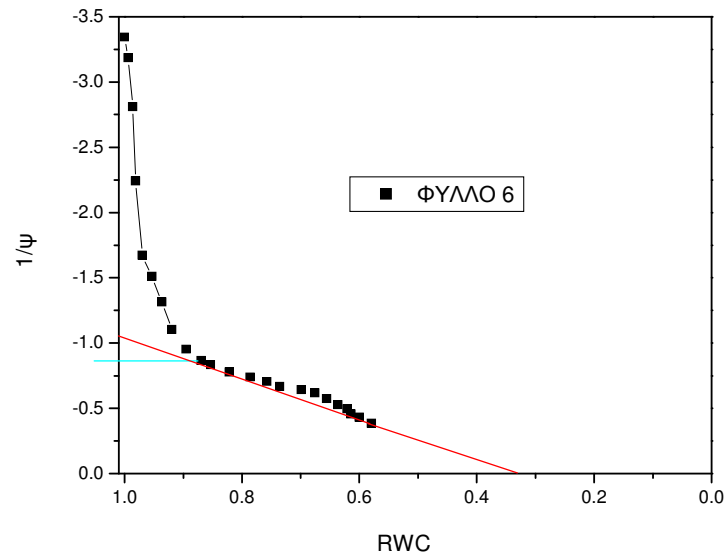
RWC:=0.432

ΨΠ100=1.020

Π0=0.77



Εικόνα 50. Καμπύλες πίεσης-όγκου και παραμέτρων νερού του ιστού σε τονισμένα φυτά.



Εικόνα 51. Καμπύλες πίεσης-όγκου και παραμέτρων νερού του ιστού σε αρδευόμενα φυτά.

Οι καμπύλες Ψ σε λειτουργία του καθαρού βάρους αναλύθηκαν αρχικά με στόχο τις πιθανές κορυφές στις υψηλές τιμές του Ψ , όπου τέτοιες κορυφές οφείλονται στην υπερβολική αποπλασματική απορρόφηση νερού μέσα στα μεσοκυττάρια διαστήματα. Οι κορυφές αφαιρέθηκαν με την εξέταση των διαγραμμάτων του καθαρού βάρους κατά του Ψ και την παράλειψη των σημείων της περιοχής οροπεδίων.

Οι διορθωμένες καμπύλες της κορυφής μετασχηματίστηκαν έπειτα κάτω από τη μορφή $1/\Psi$ έναντι του RWC οσμωτικού δυναμικού σε πλήρες σπαργή (Π_{100}). Υπολογίστηκε η γραμμική μεταβολή των στοιχείων στην περιοχή των ευθειών γραμμών των δυναμικών σπαργής στις καμπύλες πίεσης-όγκου (P-V). Στις εικόνες 50 και 51 βλέπουμε τις καμπύλες και τα εξαγόμενα συμπεράσματα των παραμέτρων του νερού στον ιστό σε αρδευόμενα και τονισμένα φυτά. Τα Π_1, Π_{100} αντιπροσωπεύουν τα οσμωτικά δυναμικά σε μηδενική και πλήρης σπαργή, αντίστοιχα. Το RWC_0 είναι η περιεχόμενη σχετική υγρασία σε μηδενική σπαργή. Για τα αρδευόμενα φυτά φαίνονται στον πίνακα 2 και για τα τονισμένα στον πίνακα 3.

Πίνακας 2. Δεδομένα RWC και $\Psi\Pi$ και Π_0 για τα αρδευόμενα φυτά.

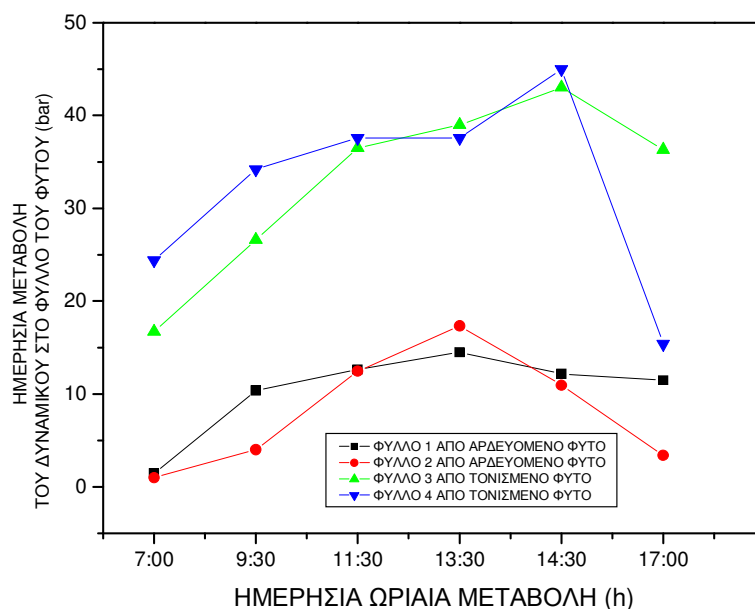
ΦΥΛΛΟ 6	ΦΥΛΛΟ 13
RWC:=0.329	RWC:=0.432
$\Psi\Pi_{100}=0.942$	$\Psi\Pi_{100}=1.020$
$\Pi_0=0.86$	$\Pi_0=0.77$
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ $\Psi\Pi_{100}=0.981$	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ $\Psi\Pi_0=0.815$

Πίνακας 3. Δεδομένα RWC και $\Psi\Pi$ και Π_0 για τα τονισμένα φυτά.

ΦΥΛΛΟ 11	ΦΥΛΛΟ 12
RWC:=0.502	RWC:=0.369
$\Psi\Pi=1.126$	$\Psi\Pi=1.455$
$\Pi_0=0.7$	$\Pi_0=0.61$
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ=1.290	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ=0.655
Το $\Psi\Pi$ είναι μεγαλύτερο κατά 31.4% από το $\Psi\Pi_{100}$	Το Π_0 είναι μικρότερο κατά 26.2%

Τα δυναμικά σπαργής (Π) είναι υπολογισμένα για μη γραμμικό τμήμα των καμπυλών, ως η διαφορά μεταξύ των ενεργών σημείων των στοιχείων και των οσμωτικών γραμμών. Το σχετικό περιεχόμενο νερό σε μηδενική σπαργή (RWC_0) όπως και το οσμωτικό δυναμικό σε μηδενική σπαργή (Π_0) προέρχεται από τις συντεταγμένες X και Y , αντίστοιχα, του πρώτου σημείου στην περιοχή της ευθείας γραμμής των καμπυλών $P-V$ όπως δείχνεται στις εικόνες 50 και 51. Αυτό το σημείο ήταν το σημείο της κάμψης στην καμπύλη $P-V$.

Επίσης οι ημερήσιες αλλαγές στο δυναμικό νερού των φύλλων (ψ) μετρήθηκε ανά δυο ώρες από τις 0700-1900, σε δύο πλήρως επεκταμένα ώριμα φύλλα χρησιμοποιώντας τον πιεστικό θάλαμο. Η διαδικασία που ακολουθήσαμε ήταν να κόβονται τμήματα δυο επιλεγμένων φύλλων πλήρως ανεπτυγμένα και ώριμα ανά δυο ώρες χρησιμοποιώντας ένα σακουλάκι. Αφού τοποθετούσαμε το φύλλο για δυο λεπτά μέσα στο σακουλάκι μέχρι να εξισορροπήσουν οι συνθήκες και να ισορροπήσει το φύλλο, έπειτα το κόβαμε και μετρούσαμε το δυναμικό νερού στο φύλλο με την μέθοδο του θαλάμου πίεσης. Η ημερήσια μεταβολή φαίνεται στην εικόνα 52.



Εικόνα 52. Ημερήσιες αλλαγές στο δυναμικό νερού των φύλλων (ψ) σε αρδευόμενα και τονισμένα φύλλα φυτών πλήρως ανεπτυγμένων σε (bar) κατά την ημερολογιακή ημέρα 251.

Το δυναμικό νερού των φύλλων (ψ) όπως και η σχετική περιεκτικότητα σε νερό (RWC) μειώθηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στα τονισμένα και στα αρδευόμενα φυτά παρατηρείται μικρό δυναμικό κατά της πρωινές ώρες το οποίο αυξάνεται κατά την διάρκεια της ημέρας και φθάνει το μέγιστο κατά της μεσημεριανές ώρες ενώ έπειτα παρατηρείται μια μείωση μέχρι της απογευματινές ώρες και τελικά την ισορρόπηση του φυτού. Στα αρδευόμενα φυτά ξεκινούσε από 1.3 bar και έφθανε κατά το μεσημέρι την τιμή των 17 bar ενώ για τα τονισμένα φυτά παρατηρήθηκε η ίδια μεταβολή με την τιμή του δυναμικού τις πρωινές ώρες να ξεκίνα από 24 bar και τις μεσημεριανές ώρες έφτανε τα 45 bar. Και τις δυο περιπτώσεις παρατηρήθηκε επαναφορά του δυναμικού των φύλλων στις αρχικές τιμές όπως φαίνεται και στην εικόνα 52. Το δυναμικό των φύλλων πριν την αυγή ήταν σημαντικά χαμηλότερο στα φυτά που ήταν τονισμένα. Η ανάλυση των καμπυλών πίεσης-όγκου δείχνει μια σημαντική διάφορα στις παραμέτρους του σχετικού νερού μεταξύ των δυο επεξεργασιών.

Στην ανάλυση της πίεσης-όγκου η οσμωτική ρύθμιση μπορεί να αντιπροσωπευθεί από τις αλλαγές είτε στο οσμωτικό δυναμικό κατά το σημείο της απώλειας σπαργής (Π_0), είτε στο οσμωτικό δυναμικό κατά τον πλήρες κορεσμό (Π_{100}). Το Π_0 είναι μια λειτουργία όχι μόνο της περιεκτικότητας σε διαλυτή ουσία του κυττάρου αλλά και του συμπλασματικού όγκου στον κορεσμό που καθορίζονται από τον συνδυασμό των οσμωτικών και ελαστικών ιδιοτήτων. Αφ' ετέρου, το Π_{100} είναι μια αυστηρή αναλογία της περιεκτικότητας σε διαλυτή ουσία του συμπλάστη και δεν επηρεάζεται από τις ελαστικές ιδιότητες του κυτταρικού τοιχώματος. Κατά συνέπεια, το Π_{100} εμφανίζεται να αποτελεί μια περισσότερο ικανή παράμετρο για να χαρακτηρίσει τις οσμωτικές ιδιότητες του ιστού των φύλλων. Οι σημαντικά χαμηλές τιμές του Π_{100} στα τονισμένα φυτά οφείλονται από τη συγκέντρωση διαλυτής ουσίας όπου αυξήθηκε στα τονισμένα φυτά. Η εμφάνιση και η έκταση μιας ενεργού οσμωτικής ρύθμισης μπορεί να καθιερωθεί μόνο μετά από μια σωστή τιμή του $\Delta\Pi_{100}$ για την επίδραση που προέρχεται από τις αλλαγές στον μη-οσμωτικό όγκο. Αυτά μπορούν να υπολογιστούν από τις αλλαγές στην αναλογία TW/DW μεταξύ των δύο επεξεργασιών. Στα αποτελέσματα υπήρξε μια αύξηση στην αναλογία TW/DW από την ξηρασία κατά συνέπεια, οι υπολογισμένες αλλαγές στο οσμωτικό δυναμικό λόγω της καθαρής συσσώρευσης διαλυτής ουσίας ($\Delta\Pi_{100}$) ήταν υψηλότερη από το $\Delta\Pi_{100}$. Η συσσώρευση διαλυτής ουσίας οδήγησε σε μείωση 31.4% του οσμωτικού δυναμικού στα τονισμένα φύλλα. Αυτή η ιδιαίτερη μείωση στο οσμωτικό δυναμικό

δείχνει ότι η οσμωτική ρύθμιση πρέπει να θεωρηθεί ως σημαντικός μηχανισμός της συντήρησης σπαργής στις καλλιέργειες σόργου υπό συνθήκες ξηρασίας.

Παρόμοια αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με τη χρησιμοποίηση της διαφοράς στο οσμωτικό δυναμικό, στο σημείο απώλειας σπαργής ($\Delta\Pi_0$) ως δείκτη της ικανότητας των φυτών για την οσμωτική ρύθμιση. Το Π_0 μειώθηκε περίπου σε 26.2% στα τονισμένα φυτά. Η ικανότητα για την οσμωτική ρύθμιση όπως αναφέρεται από τους δύο ανωτέρω τρόπους δεν διαφέρει και δεν φαίνεται ότι τα αποτελέσματα της υδάτινης καταπόνησης στις ελαστικές ιδιότητες του κυτταρικού τοιχώματος να είναι δευτερεύοντα. Το ειδικό βάρος των φύλλων μειώθηκε στα τονισμένα φύλλα που δείχνει ότι αυξάνεται η αναλογία TW/DW και αποδίδεται κυρίως σε μια μείωση στο ξηρό βάρος των φύλλων. Η παρατηρούμενη μείωση στο ξηρό βάρος των φύλλων των τονισμένων φυτών θα μπορούσε να οφείλεται όπως είναι γνωστό, στο ότι οι διαλυτές μορφές σακχάρων αυξάνονται στα τονισμένα φυτά σόργου. Η συσσώρευση των σακχάρων στα αρδευόμενα φυτά μπορεί επίσης να εξηγήσει τον χαμηλό συμπλασματικό κυτταρικό όγκο του νερού. Μια μικρή αύξηση του συμπλασματικού μέρους του νερού των φύλλων κατά τη διάρκεια των περιόδων ελλείμματος του νερού ήταν παρατηρούμενη επίσης και σε άλλα φυτά. Ο χωρισμός του νερού στα συμπλασματικά και αποπλασματικά μέρη νερού μπορεί να συμβάλει στην παθητική συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών και έτσι στη συντήρηση σπαργής στα τονισμένα φυτά. Για ένα δεδομένο ποσό διαλυτών ουσιών, ο ιστός φύλλων με ένα μεγαλύτερο αποπλασματικό μέρος νερού εκθέτει μια γρηγορότερη συγκέντρωση του διαλύματος και άρα χαμηλότερες τιμές του οσμωτικού δυναμικού καθώς το RWC μειώνεται.

Οι αρνητικές τιμές δείχνουν πιο άκαμπτο το κυτταρικό τοίχωμα και έτσι υπάρχει χαμηλότερη ελαστικότητα του ιστού. Αυτό προτείνεται ότι υπό συνθήκες ξηρασίας η ελαστικότητα του ιστού δεν παρέχει πρόσθετες δυνατότητες για τη συντήρηση της σπαργής στα τονισμένα φυτά σόργου. Όποτε το γεγονός ότι τα φυτά ήταν σε θέση να αναπτύξουν φυσιολογικούς μηχανισμούς προσαρμογής κατά τη διάρκεια αυτής της σχετικά μικρής χρονικής περιόδου στην πίεση του νερού, παρέχει ισχυρά στοιχεία για το αποτέλεσμα όπου θα μπορούσε να ισχύει επίσης για καλλιέργειες σόργου που αναπτύσσονται σε αγρούς.

Τα στοιχεία επιβεβαιώνουν ότι η οσμωτική ρύθμιση ασκεί την κυρίαρχη επιρροή στις ιδιότητες σπαργής του σόργου κάτω υπό συνθήκες ξηρασίας και ορίζουν ένα δευτερεύον ρόλο στην ελαστικότητα του ιστού στην διατήρηση της

σπαργής. Η μείωση της διαπνοής σε καταστάσεις υπερβολικής απαίτησης σε εξάτμιση ή στο ξηρό έδαφος, έχει σαν αποτέλεσμα πολλά φυτά να έχουν εξελίξει επεξεργασίες ώστε να διατηρούν την σπαργή του ιστού σε κάποιο ικανοποιητικό βαθμό. Το χαμήλωμα του οσμωτικού δυναμικού (Π) σε απόκριση κατά την υδάτινη καταπόνηση είναι ένα καλός μηχανισμός απόδειξης με το οποίο πολλά φυτά προσαρμόζονται στις ξηρές συνθήκες. Η πτώση του Π μπορεί να είναι αποτέλεσμα της απλής παθητικής συγκέντρωσης των διαλυμάτων κατά την αφυδάτωση ή της συγκέντρωσης του καθαρού διαλύματος. Η παθητική συγκέντρωση του διαλύματος λόγω της αφυδάτωσης μπορεί να αποτελέσει μια μείωση στο περιεχόμενο νερό ανά μονάδα ξηρού βάρους, μειωμένο όγκο ιστού φύλλου κατά την κυτταρική συστολή, και αλλαγές στην ελαστικότητα του ιστού φύλλου ή στην σχέση νερού μεταξύ του συμπλασματικού και αποπ्लाσματικού κλάσματος νερού.

Οι έγκυρες εκτιμήσεις της οσμωτικής ρύθμισης μπορούν μόνο να γίνουν χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Π που διορθώνονται στην πλήρη υδάτωση (Π^{100}) ή τις μετρήσεις του Π σε μηδενική σπαργή για να εξαλειφθεί η επίδραση της αφυδάτωσης. Μια μείωση στο Π^{100} μπορεί να προκύψει από την συγκέντρωση των διαλυτών ουσιών που λόγω του μειωμένου οσμωτικού όγκου έχει ως αποτέλεσμα μια αύξηση στα σάκχαρα το οποίο απεικονίζεται σε αναλογία στομφώδους έως ξηρού βάρους (TW/DW). Η πτώση στο Π^{100} λόγω της αλλαγής στην αναλογία TW/DW δεν θεωρείται ενεργός οσμωτική ρύθμιση. Το περιστατικό μιας ενεργού οσμωτικής ρύθμισης μπορεί να καθιερωθεί μόνο εάν μια καθαρή αύξηση στη διαλυτή συγκέντρωση πραγματοποιείται στην πλήρη υδάτωση.

Το μέρος του αποπ्लाσματικού νερού μελετήθηκε χρησιμοποιώντας την τεχνική πίεση - όγκου σε δέκα φύλλα από κάθε επεξεργασία. Οι καμπύλες Ψ ως λειτουργία του καθαρού βάρους αναλύθηκαν αρχικά με στόχο τις πιθανές αιχμές στις υψηλές τιμές όπου οφείλονται στην υπερβολική αποπ्लाσματική απορρόφηση του νερού μέσα στα μεσοκυττάρια διαστήματα. Οι διορθωμένες καμπύλες μετασχηματίστηκαν έπειτα κάτω από τη μορφή $1/\psi$ ως προς το RWC και χρησιμοποιήθηκαν για να διορθώσουν την επίδραση των διαλύσεων στην μέτρηση των τιμών Π . Το δυναμικό σπαργής (Π) υπολογίστηκε ως διαφορά μεταξύ του δυναμικού νερού φύλλων και διόρθωσε τις τιμές του οσμωτικού δυναμικού.

15. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα στοιχεία μας επιβεβαιώνουν ότι η οσμωτική ρύθμιση ασκεί την κυρίαρχη επιρροή στις ιδιότητες της σπαργής σε φυτά γλυκού σόργου κάτω από συνθήκες ξηρασίας και ορίζουν ένα δευτερεύον ρόλο στην ελαστικότητα ιστού κατά την διατήρηση της σπαργής.

Βλέπουμε ότι η διαφορά δυναμικού του νερού μεταξύ της ρίζας και του εδάφους διαδραματίζει τον κρίσιμο ρόλο στη λήψη του νερού από τα φυτά. Για μια συνεχή παροχή νερού, το δυναμικό νερού της ρίζας να είναι πάντα πιο αρνητικό από το δυναμικό νερού του εδάφους. Έτσι σε μια μειωμένη παροχή νερού στα φυτά σε ένα ξηρό έδαφος, η πτώση στο δυναμικό του εδάφους συνοδεύετε από μια ισοδύναμη πτώση στο δυναμικό της ρίζας. Τα φυτά όμως έχουν αναπτύξει την οσμωρύθμιση όπου επιτρέπουν σε αυτά να μειώσουν το δυναμικό του νερού τους σε πολύ αρνητικές τιμές.

Το δυναμικό του νερού των φύλλων (ψ) όπως και η σχετική περιεκτικότητα σε νερό (RWC) αυξήθηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας στα τονισμένα και αρδευόμενα φυτά όπου φθάνει στις ελάχιστες τιμές νωρίς το πρωί και το απόγευμα ενώ αυξάνετε κατά την διάρκεια της ημέρας. Το δυναμικό φύλλων πριν την αυγή ήταν σημαντικά χαμηλότερο στα αρδευόμενα φυτά από ότι στα τονισμένα φυτά. Το δυναμικό νερού των φύλλων κατά την διάρκεια της ημέρας στα αρδευόμενα και στα τονισμένα φυτά αλλά πολύ περισσότερο στα τονισμένα φυτά. Η ανάλυση των καμπυλών πίεσης-όγκου δείχνουν σημαντική διάφορα στις παραμέτρους του σχετικού νερού μεταξύ των δυο επεξεργασιών. Άρα παρατηρούμε ότι τα φυτά τα οποία είναι τονισμένα δημιουργούν οσμωρύθμιση για να εκμεταλλευτούν το λιγοστό νερό που υπάρχει στο έδαφος.

Ο όγκος του νερού που εμφανίζεται στα κυτταρικά τοιχώματα είναι σημαντικός, ως διάβαση για το νερό και την μετακίνηση της διαλυτής ουσίας ειδικά στις ρίζες και τα φύλλα. Επίσης το νερό των κυτταρικών τοιχωμάτων συμβάλλει στην αντοχή κατά της ξηρασίας στα φυτά και προκαλεί σφάλματα στη μέτρηση του δυναμικού νερού των κυττάρων λόγω του διαλύματος του σφρίγους του χυμοτοπίου. Τα χυμοτόπια περιέχουν αξιοσημείωτα ποσά σακχάρων και αλάτων που αποτελούν κατά ένα μεγάλο μέρος το οσμωτικό δυναμικό του σφρίγους των κυττάρων.

Κατά την οσμωρύθμιση τα κύτταρα χάνουν περισσότερο νερό πριν η σπαραγή τους πέσει στο μηδέν, ενώ το δυναμικό των κυττάρων αυξάνεται για να απορροφήσουν νερό υπό τις ξηρές συνθήκες. Ακόμα δημιουργείται χαμήλωμα του δυναμικού νερού των κυττάρων και διατήρηση μιας μεταβολής μεταξύ των κυττάρων των φυτών ώστε να υπάρξει μετακίνηση νερού προς τα κύτταρα.

Αυτό το φαινόμενο βοηθάει τα φυτά σε περιόδους ξηρασίας να επιβιώσουν και δρα σαν μηχανισμός ανάγκης ώστε να διατηρήσουν την διαπνοή τους σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Έτσι κατά την ανάπτυξη τους η μείωση του νερού αλλά όχι η έλλειψη του, μπορεί να μην τα μαράνει, αλλά να μπορούν να ρυθμίσουν την διαπνοή τους στις ανάλογες συνθήκες. Ακόμα μπορούμε να συνηθίσουμε τα φυτά με ειδικές τεχνικές άρδευσης ώστε να αποδίδουν καρπούς σχεδόν το ίδιο, με μειωμένη όμως ποσότητα νερού.

Το δυναμικό νερού είναι σημαντικό μέτρο για το επίπεδο νερού στο φυτό και ποικίλλει από μηδέν σε αρδευόμενα φυτά μέχρι μια χαμηλότερη τιμή από το οσμωτικό δυναμικό στα πολύ τονισμένα. Το δυναμικό νερού δείχνει τον ίδιο βαθμό πίεσης νερού σε όλα τα είδη του φυτικού ιστού. Ο μηχανισμός του οποίου η πίεση νερού μπορεί να έχει επιπτώσεις στις μεταβολικές διαδικασίες είναι οι αλλαγές στην πίεση σπαραγής.

Στην υδάτινη καταπόνηση η ισορροπία του νερού στον φυτικό ιστό προκύπτει από την ισορροπία μεταξύ της απορρόφησης και της διαπνοής του φυτού. Όταν το υδατικό δυναμικό μειώνεται στο έδαφος, μειώνεται παράλληλα και στα φύλλα. Το υδάτινο δυναμικό στα φύλλα διατηρείται χαμηλότερο από το έδαφος, ώστε να γίνεται άντληση του νερού. Όταν μειωθεί το υδάτινο δυναμικό στα φύλλα τότε υπάρχει απώλεια σπαραγής και κλείσιμο των στομάτων στα τονισμένα φύλλα, ενώ η συσσώρευση διαλυτής ουσίας οδηγεί σε μείωση του οσμωτικού δυναμικού. Τελικά η μείωση του οσμωτικού δυναμικού δείχνει ότι η οσμωρύθμιση είναι ο σημαντικότερος μηχανισμός στις καλλιέργειες σόργου για την συντήρηση της σπαραγής σε συνθήκες ξηρασίας.

Τέλος η οσμωρύθμιση παρουσιάζεται περισσότερο στα φυτά που αναπτύσσονται σε μέρη που υπάρχουν περίοδοι με βροχοπτώσεις και μετά μεγάλες ξηρασίες όπως σε τροπικά ή ξηρά κλίματα κατά το καλοκαίρι όπως στην νότια Ελλάδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αρδεύσεις II, (Β. Ζαρογιαννη), 1992, ΤΕΙ Λάρισας
2. Εδαφολογία, εργαστήρια και ασκήσεις, Κ. Τσιτσια, εκδ 1996
3. Φυσιολογία φυτών από το μόριο στο περιβάλλον σελ 47-75 ,Β. Γαλάτης, Δ. Γανωτακης , Κ. Γκανη –Σπυροπουλου, Γ.Καραμπουρνωτης, Κ. Κοτζαμπάσης, Ι. Κωνσταντινιδου, Ι Μανετας, Κ. Ρουμπελακη-Αγγελακη Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης
4. Φυτοτεχνολογία Ι (μετά στοιχείων μορφολογίας και φυσιολογίας των φυτών). Ορφανός Πέτρος
5. Evapotranspiration predictions of ceres-sorghum model in southern Italy, (A. Castrignano, V. Bari, M Stelluti), European journal of agronomy, 1997, pages 269-273
6. Mechanisms involved in diurnal changes of osmotic potential in grapevines under drought conditions (A. Patakas, B. Noitsakis), Journal plant physiology pp767-774, edition 1999
7. Microsoft encyclopedia edition 2002
8. Osmotic adjustment and partitioning of turgor responses to drought in grapevines leaves, (A.Patakas and B. Noitsakis) American society for ecology and viticulture pages 76-80
9. Plant water status, hydrylic resistance and capacitance, (Roger Koide, Robert Robichaux, Suzanne Morse, Celia Smith) pages 161-179
10. Plant moisture vessel SKPM 1400 (SKYE INSTRUMENT LIMITED, UK)
11. Water in environment, (Philip Rundel, Wesley Jarreli) pages 29-40
12. Water stress on plants, (G. M. Simpson)
13. Water relation of plants, (Paul J. Kramer), ACADEMIC PRESS INC 1983.

Internet sites

www.oikologos.gr/oldbiefnews2002/html

www.3tee-rodou.dod.sch.gr/ecology.htm

www.geo.aunt.gr/763/chl.htm

www.kpenaousas.gr/html/news.asp

www.eco-net.gr/minimal.htm

www.gugnet.gr/user/water/txt

www.oikologos.gr.fdf/html