



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ & ΑΡΔΕΥΣΕΩΝ

ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΕ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ

[*Sorghum bicolor* (L.) Moench]

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΑΦΟΣ ΚΑΙ ΛΥΟ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΕΙΣΗΓΗΤΡΙΑ: ΑΘΗΝΑ
ΘΕΟΔΩΡΑΚΟΠΟΥΛΟΥ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ
ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΣ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2005

*Το μέλλον μας χτίζεται πάνω στις επιλογές
που κάνουμε την κάθε στιγμή της ζωής μας.*

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εντατική και σχεδόν αποκλειστική χρήση των πετροχημικών ως πηγή ενέργειας στο αιώνα μας έχει ως αποτέλεσμα σήμερα την περαιτέρω επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και τη ρύπανση υγρών και χερσαίων οικοσυστημάτων. Αυτό σε συνδυασμό με τις τελευταίες ανατιμήσεις επιβάλλει την επανεξέταση του ζητήματος να χρησιμοποιηθούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να βελτιωθούν οι τεχνολογίες παραγωγής τους. Σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί είναι η ηλιακή ενέργεια μέσω της χρησιμοποίησης της βιομάζας που παράγεται από ορισμένα είδη φυτών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με καλλιέργειες ορισμένων φυτών – ενεργειακές καλλιέργειες – αξιοποιώντας τη φωτοσυνθετική τους δραστηριότητα. Η παραγόμενη φυτική βιομάζα μπορεί να καεί με οποιοδήποτε τρόπο και να αποδώσει ενέργεια ή να μετατραπεί σε άλλης μορφής καύσιμο.

Μεταξύ των φυτικών ειδών που χρησιμοποιούνται για παραγωγή βιομάζας είναι και το γλυκό σόργο (*Sorghum bicolor* (L) Moench), ένα αγρωστώδες με C₄ φωτοσυνθετικό μεταβολισμό και με προέλευση την Κεντρική Αφρική. Οι ποικιλίες αυτού του είδους έχουν την ιδιότητα να αποθηκεύουν σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις σακχάρων στο στέλεχος τους, τα οποία περειαίρω μπορούν να αξιοποιηθούν για παραγωγή βιοαιθανόλης. Το γλυκό σόργο προσαρμόζεται στις εδαφοκλιματικές συνθήκες της Νότιας Ευρώπης και δίνει ικανοποιητικές αποδόσεις. Προς τούτο, γίνονται συντονισμένες προσπάθειες στην Ε.Ε. για τη μελέτη αυτής της καλλιέργειας (προγράμματα AIR, FAIR, κ.λ.π.) προκειμένου να αποτελέσει την εναλλακτική και οικονομικά βιώσιμη λύση για παραγωγή βιοαιθανόλης, που θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο στην κίνηση οχημάτων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.) στα πλαίσια συμμετοχής του σε εθνικά και ευρωπαϊκά ερευνητικά έργα για το σόργο, έχει εγκαταστήσει πειραματικούς αγρούς σε πολλές περιοχές της Ελλάδας, συμβάλλοντας με τη σειρά του στην προσπάθεια που γίνεται για ένα φιλικότερο περιβάλλον. Για τους παραπάνω λόγους η καλλιέργεια του γλυκού σόργου έχει συμπεριληφθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση στις λεγόμενες ανταγωνιστικές ενεργειακές καλλιέργειες.

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο τη διερεύνηση των άριστων τιμών που λαμβάνει ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας του γλυκού σόργου. Στο πειραματικό μέρος αυτής της εργασίας θα παρουσιασθούν αποτελέσματα που σχετίζονται με τις μεταβολές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας

(LAI) που θεωρείται εκ των βασικών παραμέτρων δομής της φυτικής κόμης, σε συμβατική και βιολογική καλλιέργεια σακχαρούχου σόργου (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) και για δυο επίπεδα άρδευσης, με την υιοθέτηση κυρίως έμμεσων μεθόδων προσδιορισμού (indirect methods) του δείκτη φυλλικής επιφάνειας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον προϊστάμενο και Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωργικών Μηχανών και Αρδεύσεων του Τ.Ε.Ι. Μεσολογγίου κ. Μπατσούλα Νικόλαο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου εγκρίνοντας το θέμα της μελέτης. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους που συνέβαλλαν με τον ένα ή τον άλλο τρόπο στην ολοκλήρωση της εργασίας και πρωτίστως στον Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Βιολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών κ. Αγγελόπουλο Κώστα για την άψογη συνεργασία που είχαμε στο διάστημα που μεσολάβησε για την ολοκλήρωση της εργασίας. Η επιστημονική βοήθεια και οι υποδείξεις του συνέβαλλαν αναμφισβήτητα σε καθοριστικές στιγμές αυτής μου της προσπάθειας και οδήγησαν, πιστεύω, σε μια ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του θέματος.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω, την εισηγήτρια μου, κ. Θεοδωρακοπούλου Αθηνά, για την ανάθεση του θέματος και την επίβλεψη της εργασίας. Καταλυτικός παράγοντας στάθηκε η υπομονή και η αμέριστη παροχή των γνώσεων της που μου δίνονταν όποτε και όταν τις χρειαζόμουν. Ιδιαίτερα όμως θέλω να τονίσω την ανθρώπινη συμπαράσταση και την υποστήριξή της στις δυσκολίες και στα εμπόδια που προέκυψαν κατά τη διάρκειά της. Πάντοτε θεωρούσα πως πέρα από την επιστημονική προσφορά, η ανθρώπινη διάσταση στη σχέση ενός ακαδημαϊκού δασκάλου και ενός φοιτητή είναι πολύ σημαντική για την οικοδόμηση μιας ολοκληρωμένης επιστημονικής οντότητας. Εύχομαι να μην διαψεύσω τις προσδοκίες μου. Πολλές ευχαριστίες όμως οφείλω και στα μέλη του Εργαστηρίου της Φυσιολογίας Φυτών, τόσο για τις πολύτιμες υποδείξεις τους στο χειρισμό οργάνων του εργαστηρίου, όσο και για τις φιλικές και ιδιαίτερα χρήσιμες συζητήσεις που είχαμε εντός και εκτός του χώρου εργασίας. Σε όλους τους παραπάνω εύχομαι καλή συνέχεια και καταξίωση στο δύσκολο αλλά και ταυτόχρονα χρήσιμο έργο που επιτελούν.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστώ στους γονείς μου που με στήριξαν, τόσο ψυχολογικά όσο και οικονομικά, στη προσπάθειά μου αυτή καθώς και στους φίλους μου που είναι πάντα δίπλα μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ*Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.*

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

| | | |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ - ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗ | 1 |
| 1.2 | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ | 2 |
| 1.2.1 | Το γλυκό σόργο ως πρώτη ύλη για παραγωγή αιθανόλης..... | 5 |
| 1.2.1.1 | Βοτανική ταξινόμηση | 5 |
| 1.3 | ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΚΟΜΗΣ | 6 |
| 1.4 | ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ..... | 8 |
| 1.5 | Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΓΙΑ ΜΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ | 11 |
| 1.5.1 | Συσχέτιση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με άλλους δείκτες αύξησης των καλλιεργειών | 12 |
| 1.6 | Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΚΟΜΗΣ | 14 |
| 1.6.1 | Οι μέθοδοι GF..... | 15 |
| 1.7 | Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΚΟΜΗΣ ΚΑΙ Η ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ | 18 |
| 1.7.1 | Ο εκθετικός νόμος των Monsi & Saeki | 18 |
| 1.7.2 | Η διάδοση της διάχυτης ακτινοβολίας μέσα στη φυτική κόμη | 20 |
| 1.7.3 | Η εκτίμηση της ημερήσιας πρόσληψης της ηλιακής ακτινοβολίας από τη φυτική κόμη μιας καλλιέργειας..... | 23 |
| 1.8 | ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ..... | 23 |
| 1.8.1 | Περιγραφή του οργάνου - αναλυτής LAI-2000..... | 24 |
| 1.8.2 | Υποθέσεις λειτουργίας του αναλυτή LAI-2000 | 28 |
| 1.8.3 | Πραγματοποίηση των μετρήσεων με τον αναλυτή LAI-2000..... | 30 |

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

| | | |
|-----|---------------------------|----|
| 2.1 | ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ | 33 |
|-----|---------------------------|----|

3 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

| | | |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ..... | 34 |
| 3.2 | ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ | 35 |
| 3.3 | ΕΙΔΗ ΑΥΤΟΦΥΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΤΕΜΑΧΙΑ | 35 |
| 3.4 | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ..... | 35 |
| 3.5 | Η ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΙΤΩΝ..... | 38 |
| 3.6 | Η ΑΡΔΕΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ..... | 41 |
| 3.7 | Η ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ | 42 |
| 3.8 | ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ | 43 |
| 3.9 | ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ LAI ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ..... | 44 |

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

| | | |
|-----|-----------------------------------------------------|----|
| 4.1 | ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΓΡΟΚΤΗΜΑΤΟΣ..... | 45 |
| 4.2 | ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΓΡΟΚΤΗΜΑΤΟΣ..... | 46 |
| 4.3 | ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ | 49 |
| 4.4 | ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ | 53 |
| 4.5 | ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (LAI)..... | 54 |

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

| | | |
|-----|--------------------|----|
| 5.1 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 62 |
|-----|--------------------|----|

| | |
|-----------------------|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | 63 |
|-----------------------|----|

| | |
|----------------------|----|
| SUMMARY | 64 |
|----------------------|----|

| | |
|---------------------------|----|
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 65 |
|---------------------------|----|

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ - ΒΙΟΑΙΘΑΝΟΛΗ

Η όξυνση των περιβαλλοντικών προβλημάτων κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα κάνει όλο και πιο επιτακτική την ανάγκη να αντιμετωπιστούν από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα τα μεγάλα οικουμενικά περιβαλλοντικά ζητήματα. Μεταξύ των προβλημάτων που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση των συμβατικών καυσίμων και η εξεύρεση νέων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η κατανάλωση συμβατικών (ορυκτών) καυσίμων που σήμερα καλύπτει περίπου 95% των παγκοσμίων ενεργειακών απαιτήσεων, συνέβαλε σημαντικά στη ραγδαία οικονομική ανάπτυξη αλλά και στη δραματική επιβάρυνση της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Τα ορυκτά καύσιμα συμβάλλουν σημαντικά σε πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα αφού η καύση τους μεταξύ άλλων, αυξάνει τις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα συμβάλλοντας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην αύξηση του διοξειδίου του θείου που συμβάλλει στο φαινόμενο της όξινης βροχής. Υπολογίζεται ωστόσο ότι τα συμβατικά ενεργειακά αποθέματα θα μειωθούν αισθητά μέχρι το 2100 και η χρήση τους θα είναι πλέον πολυτέλεια.

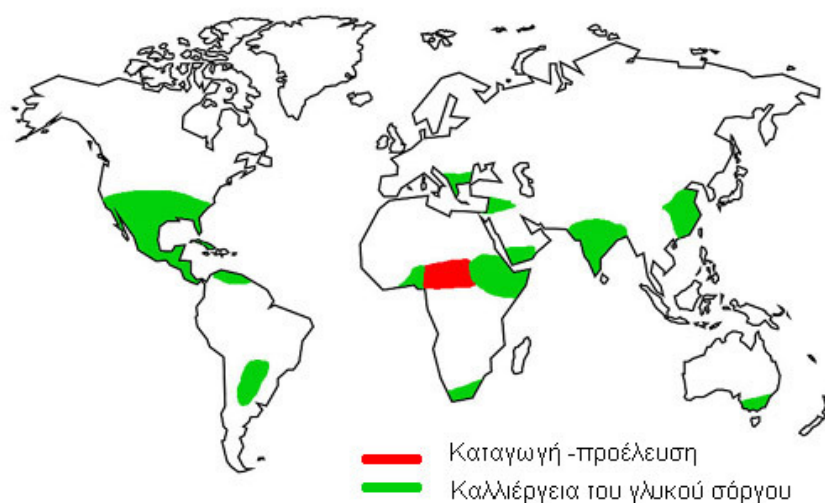
Η τεχνολογική πρόοδος των τελευταίων δεκαετιών επέτρεψε την ανάπτυξη εναλλακτικών πηγών ενέργειας, ανανεώσιμων και πιο αξιόπιστων από τα παραδοσιακά καύσιμα. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική, η ηλιακή αλλά και η βιομάζα, η οργανική ύλη που αναπτύσσεται με τη φωτοσυνθετική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας, είναι πηγές ενέργειας με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τις συμβατικές. Η βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε βιοκαύσιμα όπως βιοαέριο και βιοαιθανόλη που καίγονται καθαρότερα εκπέμποντας λιγότερα καυσαέρια από τα προϊόντα πετρελαίου και αποτελούν εξαιρετικής σημασίας λύση για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Για την παραγωγή της χρησιμοποιούνται βραχείας απόδοσης δασικές καλλιέργειες πολυετών ειδών (λεύκη, ακακία κ.λ.π.) αλλά και γεωργικές καλλιέργειες ετήσιων ειδών (ζαχαροκάλαμο, αραβόσιτος, σόργο, κ.λ.π.) όπως επίσης αγροτικά και αστικά απορρίμματα. Η παραγωγή ενέργειας από βιομάζα είναι μια διεργασία 100% ανανεώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον.

Την τελευταία δεκαετία η Ευρωπαϊκή Ένωση ενδιαφέρεται όλο και περισσότερο για την παραγωγή βιοαιθανόλης. Δίδονται σημαντικά κίνητρα (π.χ. φορολογικές απαλλαγές) για τη δημιουργία και την επέκταση του ενδιαφέροντος

στους τομείς παραγωγής και χρήσης της βιοαιθανόλης. Η Ευρωπαϊκή Ένωση χρηματοδότησε πάνω από 70 προγράμματα για υγρά βιοκαύσιμα την περίοδο 1985-1996. Η Ελλάδα ανέλαβε 5 προγράμματα και συμμετείχε σε άλλα 20 [http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/lbrtde.html]. Για θέμα καθαρά προστασίας του περιβάλλοντος έχει θεσπιστεί η 2003/30/EK οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης σύμφωνα με την οποία όλα τα κράτη-μέλη πρέπει να αντικαταστήσουν σταδιακά τη βενζίνη και το πετρέλαιο κίνησης με βιοκαύσιμα σε ποσοστό 2% έως το 2005 και σε ποσοστό 5,7% έως το 2010. Σύμφωνα με στοιχεία του 2001, τα σκήπτρα στην παραγωγή αιθανόλης έχει η Γαλλία με 34%, ακολουθεί η Μ. Βρετανία με 18%, η Γερμανία με 17%, η Ιταλία με 9% και οι υπόλοιπες χώρες με 22% [<http://www.distill.com/berg/>].

1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Το γλυκό σόργο ή διαφορετικά σακχαρούχο σόργο [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] ανήκει στην οικογένεια των αγραστωδών (Gramineae) και είναι ένα φυτό με C₄ μεταβολισμό και παρόμοια εμφάνιση με το καλαμπόκι και το ζαχαροκάλαμο. Το φυτικό αυτό είδος έχει την καταγωγή του στην κεντρική Αφρική, αλλά έχει προσαρμοστεί με επιτυχία και στα εύκρατα κλίματα (εικόνα 1.2.1). Κύριο χαρακτηριστικό του φυτού είναι η ικανότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων σακχάρων στο στέλεχος.



Εικόνα 1.2.1. Η καταγωγή και η γεωγραφική εξάπλωση της καλλιέργειας του φυτού *Sorghum bicolor*. [<http://www.uni-hohenheim.de/%7Eiirspwww/350b/indexe.html>].

Τα τελευταία χρόνια έχει ενταθεί το ενδιαφέρον για την καλλιέργεια του γλυκού σόργου, καθώς τα ζυμώσιμα σάκχαρα του στελέχους (9-14%) είναι κατάλληλα για την παραγωγή βιοαιθανόλης, που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως βιο-καύσιμο για την κίνηση και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός είναι και ο λόγος που χαρακτηρίζεται ως ενεργειακό φυτό, ενώ η καλλιέργειά του στη νότια και κεντρική Ευρώπη έχει προταθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση ως μια ανταγωνιστική ενεργειακή καλλιέργεια.

Είναι φυτό μακράς διάρκειας ημέρας και οι περισσότερες ποικιλίες του απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες (περίπου 27-30°C) για την καλύτερη ανάπτυξή τους. Το γλυκό σόργο πολλαπλασιάζεται με σπέρματα. Δύο πολύ διαδεδομένες ποικιλίες στον Ευρωπαϊκό χώρο είναι η Keller και η Korall. Το φύτεμα των σπόρων πραγματοποιείται σε ένα βάθος από την επιφάνεια του εδάφους που κυμαίνεται μεταξύ 1-2 cm, βάθος που εξαρτάται από τη δομή και την υγρασία του εδάφους. Θερμοκρασίες εδάφους που ξεπερνούν τους 15°C, θεωρούνται βέλτιστες για τη βλάστηση των σπερμάτων. Στις τροπικές περιοχές το φύτεμα των σπόρων είναι δυνατόν να γίνει σε οποιαδήποτε εποχή του χρόνου, ενώ στις εύκρατες περιοχές γίνεται κατά την άνοιξη. Στις κλιματικές συνθήκες της νότιας Ευρώπης, η σπορά γίνεται από τα μέσα έως το τέλος της εαρινής περιόδου. Οι συνιστώμενες αποστάσεις σποράς που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, είναι 70 cm μεταξύ των γραμμών και 10-20 cm εντός των γραμμών (Dalianis *et al.*, 1996).

Το ύψος των ώριμων φυτών κυμαίνεται μεταξύ 3,5-4,5 m και εξαρτάται από την ποικιλία και τις καλλιεργητικές πρακτικές. Το φύλλωμά του είναι πλατύ με κοίλη και λεία φυλλική επιφάνεια και σχήμα παρόμοιο με αυτό του καλαμποκιού (εικόνα 1.2.2 και 1.2.3). Η φυλλική επιφάνεια επίσης καλύπτεται από μια κηρώδη ουσία που μειώνει τις απώλειες σε νερό. Το γεγονός αυτό το καθιστά πιο ανθεκτικό στην ξηρασία. Ο αριθμός των φύλλων, όταν τα φυτά βρίσκονται σε πλήρη ανάπτυξη, κυμαίνεται μεταξύ 8-24 εξαρτώμενος από τις συνθήκες της καλλιέργειας. Αντίστοιχα το μήκος των φύλλων κυμαίνεται από 30-135 cm και το μέγιστο πλάτος από 1,5-13 cm. Οι κολεοί περιβάλλουν το στέλεχος, που συνήθως είναι κυρτό. Τα ακραία τμήματα των κολεών επικαλύπτονται. Η διάμετρος του στελέχους κυμαίνεται από 5-40 mm. Το ριζικό σύστημα των φυτών είναι θυσανώδες με πλούσια διακλάδωση που φθάνει στο 1 m πλευρικά και σε βάθος μέχρι και τα 1,8 m και εμφανίζει σχεδόν διπλάσια ικανότητα απορρόφησης νερού από το έδαφος σε σχέση με το καλαμπόκι. [<http://www.mainsection.asp.html>].



Εικόνα 1.2.2 Τα φύλλα ενός μικρού φυτού γλυκού σόργου. (Από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών).



Εικόνα 1.2.3 Αναπτυγμένα φυτά καλλιέργειας γλυκού σόργου μετά την περίοδο της άνθησης. (Από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών).

Το περίβλημα των αναπτυγμένων φυτών προσομοιάζει σε επίμηκες ελλειψοειδές, ενώ η κατανομή των γωνιών των φυτών, παρά το γεγονός ότι εξαρτάται από τις καλλιεργούμενες συνθήκες, είναι κυρίως ελλειψοειδής. Η δομή της φυτικής

κόμης του είναι παρόμοια με αυτή του καλαμποκιού και διαφοροποιείται ανάλογα με το ύψος που φθάνουν τα φυτά της καλλιέργειας.

Το γλυκό σόργο είναι δυνατόν να αναπτυχθεί με την ίδια επιτυχία σε διάφορους τύπους εδαφών όπως τα αργιλώδη, τα πηλώδη, τα ασβεστολιθικά, καθώς και σε αυτά που είναι πλούσια σε οργανική ύλη. Αντέχει σε pH εδάφους μεταξύ 5,5 και 8,0. Είναι επίσης ανθεκτικό σε εδάφη με υψηλή αλατότητα και αλκαλικότητα, καθώς και σε εδάφη που δεν έχουν καλή αποστράγγιση. Χαρακτηρίζεται ως ανθεκτικό στη ξηρασία καλλιεργούμενο είδος, που έχει τη δυνατότητα να επιβιώνει για μεγάλα χρονικά διαστήματα κάτω από συνθήκες ξηρασίας, αναστέλλοντας την ανάπτυξή του, ενώ επανέρχεται σε φυσιολογικούς ρυθμούς ανάπτυξης όταν οι συνθήκες γίνουν ευνοϊκές.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν φυτά γλυκού σόργου, ποικιλίας Keller, που καλλιεργήθηκαν σε συνθήκες συμβατικής και βιολογικής καλλιέργειας και κάτω από δυο επίπεδα στάγδην άρδευσης.

1.2.1 Το γλυκό σόργο ως πρώτη ύλη για παραγωγή αιθανόλης

Το γλυκό σόργο [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] είναι εξαιρετικής σημασίας φυτό λόγω του ότι δίνει υψηλές στρεμματικές αποδόσεις και η βιομάζα του περιέχει ίσες περίπου ποσότητες διαλυτών και αδιάλυτων σακχάρων.

1.2.1.1 Βοτανική ταξινόμηση

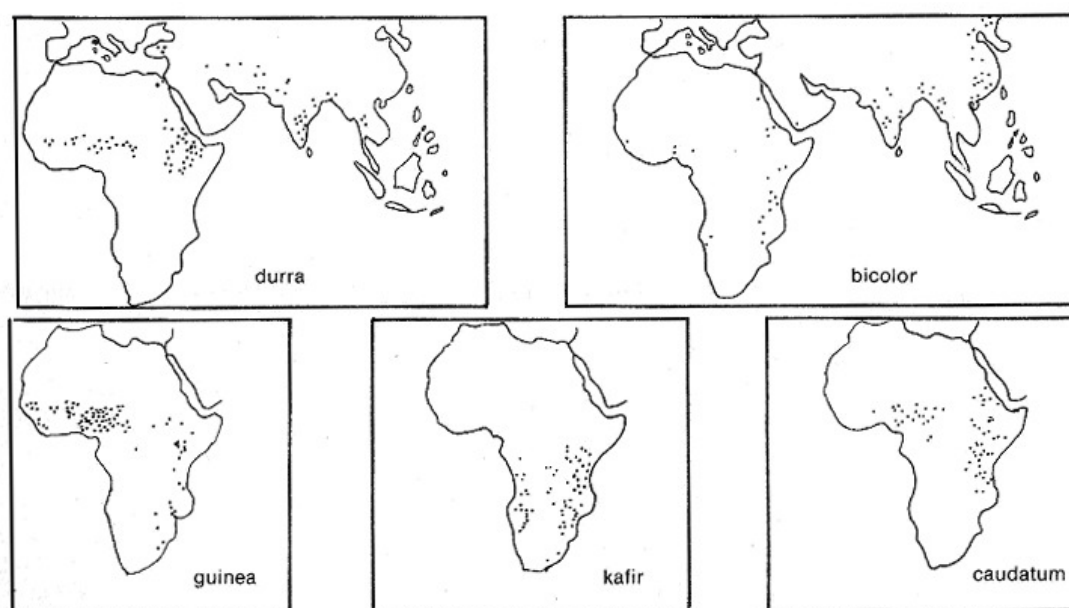
Τα καλλιεργούμενα φυτά του *Sorghum bicolor* (L.) Moench, άλλοτε *Sorghum vulgare* Pers., ταξινομούνται στις εξής τέσσερις κατηγορίες:

1. Το σποροπαραγωγικό (grain) σόργο καλλιεργείται κυρίως για παραγωγή σπερμάτων. Συναντάται συχνά σε χώρες της Αφρικής, την Ινδία και τις Η.Π.Α. Στην Αφρική και την Ινδία τα σπέρματα του γλυκού σόργου χρησιμοποιούνται για ανθρώπινη κατανάλωση και στις Η.Π.Α. ως τροφή για τα ζώα.
2. Το σόργο για σκούπες (broomcorn), χρησιμοποιείται κυρίως για κατασκευή σκουπών από τις ταξιανθίες του φυτού. Το ινώδες (fibre) σόργο είναι υβρίδιο μεταξύ του σποροπαραγωγικού (grain) σόργου και του σόργου για σκούπες (broomcorn), έχει υψηλό ποσοστό κυτταρίνης και μικρή περιεκτικότητα σε διαλυτά σάκχαρα.
3. Το “sudangrass” καλλιεργείται για ζωοτροφή.

4. Το γλυκό σόργο (sweet sorghum) καλλιεργείται κυρίως για παραγωγή σιροπιού.

Ο διαχωρισμός μεταξύ του σποροπαραγωγικού, του ινώδους και του γλυκού σόργου δεν είναι αυστηρός αλλά παρουσιάζει μια φυσιολογική σχέση (ενδιάμεσοι γενότυποι).

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι τοποθεσίες ανά τον κόσμο που καλλιεργούνται, αναπτύσσονται και χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι σόργου.



Εικόνα 1.2.1.1 Τοποθεσίες ανά τον κόσμο που απαντώνται οι διάφορες ποικιλίες σόργου. (De Wet *et al.*, 1970).

1.3 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΚΟΜΗΣ

Η περιγραφή της δομής της φυτικής κόμης είναι απαραίτητη ώστε να κατανοήσουμε την πορεία ανάπτυξης των φυτών, αφού επιδρά σε βάθος στη δομή δημιουργώντας μια σχέση αλληλεπίδρασης μεταξύ φυτού και περιβάλλοντος. Η αρχιτεκτονική του υπέργειου τμήματος των φυτών μιας καλλιέργειας δεν επηρεάζει μόνο τις ροές ενέργειας και μάζας μεταξύ του φυτού και του περιβάλλοντός του, αλλά μπορεί επίσης να αποκαλύψει μια στρατηγική του φυτού που έχει να κάνει με της μεγάλης διάρκειας διαδικασίες, όπως η προσαρμογή σε φυσικούς, χημικούς ή βιοτικούς παράγοντες που αντανακλούν την ζωτική δραστηριότητα των οργανισμών ή τις ιδιορρυθμίες της ανάπτυξης.

Ως φυτική κόμη (plant canopy), ορίζουμε το σύνολο των υπέργειων οργάνων μιας φυτοκοινωνίας ενώ το μέγεθος, τη διάταξη και οργάνωσή τους στο χώρο ως δομή της φυτικής κόμης (plant canopy structure). Ένας πιο λεπτομερής ορισμός της δομής, θα προσέθετε ότι η διάταξη και οργάνωση στο χώρο αναφέρεται σε παραμέτρους όπως το σχήμα, το μέγεθος, τον προσανατολισμό και τη χωρική κατανομή των διάφορων φυτικών οργάνων ή στοιχείων, όπως είναι τα φύλλα, οι βλαστοί, οι βραχίονες, τα άνθη και οι καρποί. Ωστόσο, στη δομή της φυτικής κόμης, βαρύνουσα σημασία έχουν τα φύλλα, καθώς είναι αυτά που κυρίως διαμορφώνουν τον τύπο της δομής ή διαφορετικά την αρχιτεκτονική της.

Η αρχιτεκτονική της φυτικής κόμης διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε μια φυτοκοινωνία, καθώς καθορίζει τις ροές ενέργειας και μάζας ανάμεσα στα φυτά και στο περιβάλλον τους, ενώ ρυθμίζει και μια σειρά από φυσιολογικές λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα, ο τύπος της δομής, καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο διαδίδεται η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στη φυτική κόμη, διαμορφώνοντας αυτό που ονομάζουμε ως «το μικροκλίμα της ακτινοβολίας». Ακόμα, η παρουσία και η δομή της φυτικής κόμης ασκεί μεγάλη επίδραση στην κατακόρυφη μεταβολή της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Επιπλέον, επιδρά στην πρόσληψη και μεταφορά των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, στη ροή του ανέμου, στη διαμόρφωση της εδαφικής θερμοκρασίας και υγρασίας αλλά και της ροής της θερμότητας στο έδαφος. Έτσι η φυτική κόμη μπορεί να είναι σημαντική στον καθορισμό του φυσικού περιβάλλοντος άλλων οργανισμών μέσα στη φυτοκοινωνία και στην επιτυχή ή όχι εγκατάσταση και ανάπτυξή τους.

Επίσης, η δομή της φυτικής κόμης είναι δυνατόν να επηρεάσει με έμμεσο τρόπο:

1. Φυσιολογικές διαδικασίες, όπως αυτές της φωτοσύνθεσης, της αναπνοής, της κυτταρικής αύξησης και της φωτομορφογένεσης.
2. Τη μόλυνση και μετάδοση των παθογόνων.
3. Την αύξηση και τον πολλαπλασιασμό των εντόμων.
4. Τον ανταγωνισμό μεταξύ των ειδών μιας φυτοκοινωνίας.

Η έμμεση επίδραση στην υγρασία και τη θερμοκρασία του εδάφους, μπορεί επίσης να επηρεάσει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, τις απώλειες νερού λόγω εξάτμισης, τις διαδικασίες αποικοδόμησης των φυτικών υπολειμμάτων και την

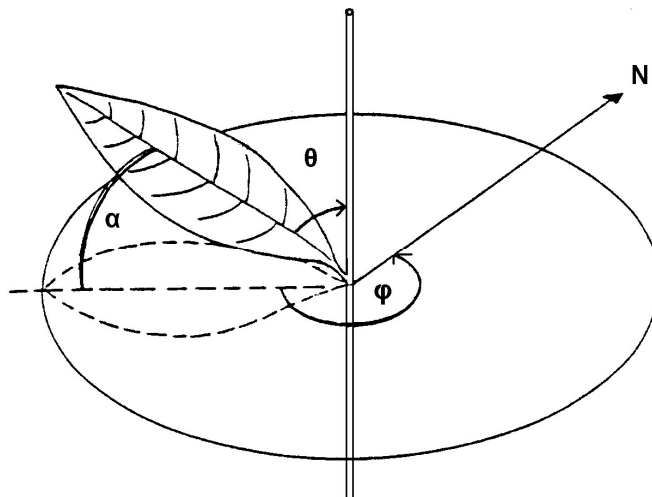
ανάπτυξη μικροβιακών πληθυσμών στο έδαφος (Campbell & Norman, 1988, Nobel, Forseth & Long, 1993).

Μια πλήρης περιγραφή της φυτικής κόμης απαιτεί τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης, του μεγέθους και του προσανατολισμού του κάθε στοιχείου αυτής. Μια τέτοια περιγραφή είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί ακόμα και σήμερα και αυτό γιατί η πολυπλοκότητα της δομής αυξάνει σημαντικά, καθώς περνάμε από το επίπεδο των μεμονωμένων οργάνων στο σύνολο του φυτού και στη συνέχεια στη φυτοκοινωνία των καλλιεργούμενων ειδών (stands). Έτσι ακόμα και στην περίπτωση των απλών τύπων φυτικής κόμης, η περιγραφή της δομής στο χώρο και στο χρόνο προσδιορίζεται κατά προσέγγιση με τη βοήθεια μαθηματικών και στατιστικών παραμέτρων.

1.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των σημαντικότερων παραγόντων προσδιορισμού της δομής της φυτικής κόμης, θα αναφερθούμε εν συντομία σε ορισμένες βασικές έννοιες, χρήσιμες για την κατανόηση της ανάλυσης που θα ακολουθήσει.

Ως γωνία ή κλίση του φύλλου (α) (leaf inclination) ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα του φύλλου και στο οριζόντιο επίπεδο (εικόνα 1.4.1) ή διαφορετικά είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κάθετη ευθεία στην επιφάνεια του φύλλου και τον κατακόρυφο άξονα. Ο τύπος της κατανομής των γωνιών μιας φυτικής κόμης είναι δυνατόν να εκφραστεί με την απεικόνιση του γραφήματος των σχετικών συχνοτήτων των γωνιών των φύλλων, όταν κατηγοριοποιηθούν σε κλάσεις, συνήθως των 10° ή 15° . Οι 0° αντιστοιχούν σε επίπεδα ή οριζόντια φύλλα, ενώ οι 90° σε κάθετα ή κατακόρυφα φύλλα.



Εικόνα 1.4.1 Η γωνία κλίσης (α), η ζενίθεια (θ) και η αζιμούθια γωνία (ϕ) ενός φύλλου.

Οι περισσότεροι τύποι των φυτικών καλλιεργειών ανήκουν σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες κατανομών των γωνιών των φύλλων (Hay & Walker, 1989) (εικόνα 1.4.2):

- Ορθόφυλλα (erectophile). Τα φυτά που ανήκουν στην κατηγορία αυτή, έχουν γωνίες φύλλων μεγαλύτερες από 60° . Τέτοια φυτά είναι οι γλαδιόλοι (*Gladiolus*) και τα περισσότερα είδη των αγρωστωδών.
- Πλαγιόφυλλα (plagiophile). Εδώ συναντάμε φυτά με γωνίες φύλλων που κυμαίνονται ανάμεσα στις 30° και 60° , όπως π.χ το ζαχαρότευτλο.
- Επιπεδόφυλλα (planophile). Εδώ ανήκουν τα φυτά με γωνίες φύλλων μικρότερες των 30° , όπως π.χ το τριφύλλι, ο ηλιάνθος, το φασόλι, η κολοκυθιά κ.ά.

Ωστόσο υπάρχουν και καλλιέργειες, όπως αυτές του αραβόσιτου και του σόργου, όπου τα φύλλα ανήκουν σε διάφορες κλάσεις γωνιών και ο προσδιορισμός της κατανομής τους είναι περισσότερο πολύπλοκος. Στις περιπτώσεις αυτές συχνά υπολογίζεται μια μέση γωνία κλίσης (mean tilt angle - MTA).



Εικόνα 1.4.2 Κύριες κατηγορίες των φυτών με βάση τη γωνία των φύλλων τους: (α) Ορθόφυλλα, (β) Επιπεδόφυλλα, (γ) Πλαγιόφυλλα.

Η ζενίθεια γωνία (θ) ενός φύλλου είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στον άξονα του φύλλου και σε έναν άξονα κάθετο στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ έχει πεδίο τιμών από 0 έως $\pi/2$. Ο προσανατολισμός του φύλλου ή η αζιμούθια γωνία του (ϕ), εκφράζεται από τη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο Βορρά (N) και στην οριζόντια προβολή του άξονα του φύλλου (εικόνα 1.4.1). Η αζιμούθια γωνία παίρνει τιμές από 0 έως 2π με θετική κατεύθυνση αντίθετη προς την κίνηση των δεικτών του ρολογιού. Στους περισσότερους τύπους φυτικής κόμης ο αζιμούθιος προσανατολισμός θεωρείται περίπου τυχαίος και εκφράζεται με την απεικόνιση της σχετικής συχνότητας των αζιμούθιων γωνιών της φυτικής κόμης σε κλάσεις, τυπικά ανά 45° , θεωρώντας $\phi = 0^\circ$ στο Βορρά (N), $\phi = 90^\circ$ στην Ανατολή (E), $\phi = 180^\circ$ στο Νότο (S), και $\phi = 270^\circ$ στη Δύση (W).

Για τον έλεγχο της μη τυχαίας κατανομής του προσανατολισμού του φυλλώματος της φυτικής κόμης εξετάζεται πάντα η κατανομή ως προς τα τέσσερα σημεία του ορίζοντα (cardinal leaf direction). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφέρουμε ότι κάποια φύλλα αλλάζουν τον προσανατολισμό τους κατά τη διάρκεια της ημέρας είτε γιατί ακολουθούν τα ίχνη του ήλιου (ηλιοτροπισμός), είτε λόγω ναστικών κινήσεων. Ο άνεμος επίσης επηρεάζει σε μικρή χρονική κλίμακα τον προσανατολισμό του φυλλώματος.

Για την παράλληλη μέτρηση της κλίσης και του προσανατολισμού των φύλλων χρησιμοποιείται μια μικτή διάταξη μοιρογνωμονίου - μαγνητικής πυξίδας (compass protractor device).

1.5 Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΓΙΑ ΜΙΑ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (leaf area index – LAI) αντανακλά σε μεγάλο βαθμό την πραγματική παραγωγική ικανότητα, δηλαδή την απόδοση μιας καλλιέργειας. Η γνώση των μεταβολών του δείκτη, καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας, αποτελεί ένα μέτρο της παραγωγικότητάς της, καθώς και ένα τρόπο για την κατανόηση και παρακολούθηση οντογενετικών αλλαγών και χαρακτηριστικών ανάπτυξης (Watson, 1958).

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας εκφράζει το συνολικό άθροισμα της επιφάνειας της μιας πλευράς των φύλλων της φυτικής κόμης ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους (m^2 φυλλικής επιφάνειας / m^2 επιφάνειας εδάφους) (Daughtry, 1990, Ross, 1981).

Ωστόσο, οι Campbell & Norman (1998), εντοπίζουν μια πολύ σημαντική διαφορά ως προς τον ορισμό του LAI. Θεωρούν ότι αυτό που οι περισσότεροι ορίζουν ως δείκτη φυλλικής επιφάνειας αντιστοιχεί στον αθροιστικό δείκτη της φυλλικής ημι-επιφάνειας (HSAI - cumulative hemi-surface area index). Στην περίπτωση μιας φυτικής κόμης με λεπτά και επίπεδα φύλλα, ο HSAI ταυτίζεται με το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI), που όμως αντιστοιχεί στην επιφάνεια που δημιουργεί η προβολή στο οριζόντιο επίπεδο των στοιχείων της φυτικής κόμης ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους (m^2 του προβαλλόμενου, στο οριζόντιο επίπεδο, τμήματος της φυλλικής επιφάνειας / m^2 επιφάνειας εδάφους).

Στην περίπτωση περισσότερο πολύπλοκων φυλλικών σχηματισμών, δηλαδή μιας φυτικής κόμης με κοίλη (π.χ αραβόσιτος, ζαχαροκάλαμο, σόργο) ή κυλινδρική φυλλική επιφάνεια (π.χ οι βελόνες αρκετών κωνοφόρων δέντρων), ο HSAI δεν ισούται με το LAI (π.χ οι κυλινδρικού σχήματος βελόνες των κωνοφόρων έχουν $\text{HSAI} = (\pi/2) \cdot \text{LAI}$). Επίσης σε μια πολύπλοκου σχήματος φυτική κόμη ο LAI δεν παραμένει σταθερός, καθώς ένα σημαντικό μέρος του συνόλου των προβαλλόμενων στο οριζόντιο επίπεδο τμημάτων της φυτικής κόμης συχνά δεν καταγράφεται, λόγω της αλληλοεπικάλυψης των στοιχείων της.

Ο LAI, η διάταξη των φύλλων και η δομή της φυτικής κόμης γενικότερα, καθώς και το ύψος των βλαστών σε κάθε χρονική περίοδο της καλλιέργειας, αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες για τον ανταγωνισμό των φυτών αυτής σε ότι αφορά την ηλιακή ακτινοβολία και την επάρκεια του φωτός. Οι διαφορές στην παραγωγικότητα τόσο σε φυτοκοινωνίες όσο και σε καλλιεργούμενες ποικιλίες εξαρτώνται από το βαθμό αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας από τη φυτική κόμη των φυτικών ειδών κάτι που αντανάκλαται από τις υψηλές τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Οι τιμές του LAI κυμαίνονται από 3 έως 6 για τις περισσότερες των καλλιεργειών σε εύκρατες περιοχές. Οι τιμές αυτές είναι μεγαλύτερες σε μεσογειακά και τροπικά κλίματα και κυμαίνονται από 6 έως 11 (Kvet *et al.*, 1971).

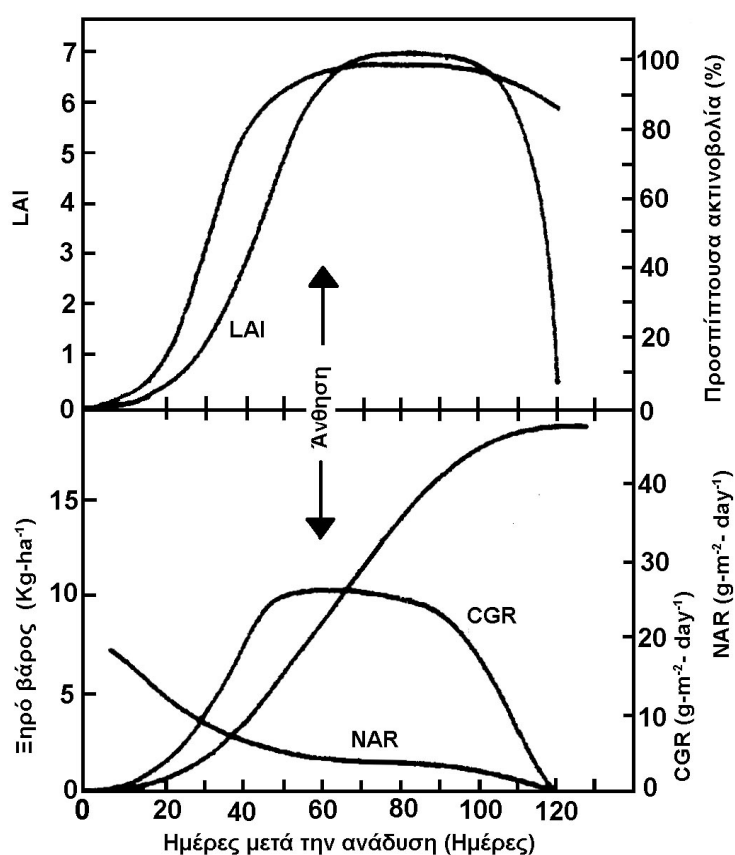
Στις ετήσιες καλλιέργειες, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας αυξάνεται εκθετικά κατά την περίοδο της έντονης ανάπτυξης των φυτών, αποκτά μια μέγιστη τιμή κατά την περίοδο της άνθησης (αναπαραγωγική περίοδος) και ακολούθως υφίσταται μείωση στο διάστημα πριν από το τέλος της καλλιέργειας, που οφείλεται στη γήρανση και στη σταδιακή πτώση των μεγαλύτερων σε ηλικία φύλλων των φυτών της καλλιέργειας (Watson, 1958). Η μέγιστη τιμή του LAI καθορίζεται από την πυκνότητα της καλλιέργειας, που ρυθμίζεται από την πυκνότητα της φύτευσης, από τη λίπανση και τους καλλιεργητικούς χειρισμούς. Σε φυσικά οικοσυστήματα και φυτοκοινωνίες, ο LAI αυξάνει κατά τρόπο που εξαρτάται από το ισοζύγιο του νερού, την επάρκεια σε θρεπτικά στοιχεία, την κατανομή του φωτός μέσα στη φυτική κόμη και μια σειρά από άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ θερμοκρασία).

1.5.1 Συσχέτιση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με άλλους δείκτες αύξησης των καλλιεργειών

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας ουσιαστικά περιγράφει το μέγεθος της «φωτοσυνθετικής μηχανής» μιας φυτοκοινωνίας και λειτουργεί ως βασικός δείκτης για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ανάπτυξης μιας καλλιέργειας (Kvet *et al.*, 1971). Όπως είναι γνωστό, ο ρυθμός αύξησης (CGR) μιας καλλιέργειας εξαρτάται από το δείκτη της φυλλικής επιφάνειας (LAI) και το ρυθμό της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας (NAR), καθώς εκφράζεται από το γινόμενο των δυο αυτών μεγεθών. Ο δείκτης NAR, συνήθως μειώνεται κατά τη διάρκεια ανάπτυξης της καλλιέργειας, καθώς συσχετίζεται αρνητικά με το δείκτη φυλλικής επιφάνειας και κατά συνέπεια με όλους τους παράγοντες που συντελούν στην αύξησή του (παροχή αζώτου, πυκνότητα

φύτευσης, σκίαση, υψηλά επίπεδα παροχής νερού κ.ά.). Λόγω της αποδεδειγμένης επίδρασης που έχει ο LAI στον NAR (Watson, 1958), ουσιαστικά ο LAI αποτελεί το βασικό παράγοντα που καθορίζει το ρυθμό αύξησης της καλλιέργειας (CGR) (Kvet *et al.*, 1971).

Στην εικόνα 1.5.1.1 μπορούμε να δούμε μια τυπική εξέλιξη των ανωτέρω δεικτών για τη χρονική περίοδο αύξησης μιας καλλιέργειας από την ημερομηνία ανάδυσης των φυτών και τις μεταβολές της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη φυτική κόμη της καλλιέργειας την ίδια περίοδο.

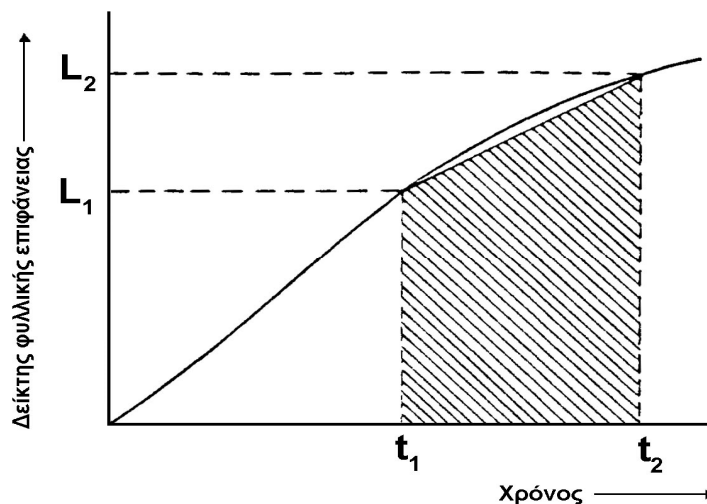


Εικόνα 1.5.1.1 Τυπικές μεταβολές των δεικτών αύξησης μιας καλλιέργειας αγρωστώδους.

Συχνά όμως μας ενδιαφέρει η προοπτική βελτιστοποίησης των λειτουργιών, όπως η μεγιστοποίηση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας κάτι που έχει άμεση σχέση με την αρχιτεκτονική του φυλλώματος.

Από την συνάρτηση μεταβολής του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με το χρόνο, μπορούμε με ολοκλήρωση να προσδιορίσουμε για ένα χρονικό διάστημα ένα άλλο

δείκτη αύξησης της καλλιέργειας που καλείται διάρκεια φυλλικής επιφάνειας (Leaf Area Duration – LAD). Ο ανωτέρω δείκτης είναι η επιφάνεια (γραμμοσκιασμένη) κάτω από την καμπύλη μεταβολής του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και του άξονα του χρόνου για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (εικόνα 1.5.1.2), και αποτελεί δε ένα μέτρο των αποδόσεων σε βιομάζα της καλλιέργειας.



Εικόνα 1.5.1.2 Ο υπολογισμός του δείκτη LAD (γραμμοσκιασμένη περιοχή) με τη γραφική παράσταση της μεταβολής του LAI με το χρόνο.

1.6 Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΚΟΜΗΣ

Η μέτρηση της δομής της φυτικής κόμης βασίζεται σε μεθόδους – τεχνικές που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό ορισμένων εκ των παραμέτρων της δομής της. Οι τεχνικές αυτές κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Άμεσες μέθοδοι μέτρησης
2. Ημι-άμεσες μέθοδοι μέτρησης
3. Έμμεσες μέθοδοι μέτρησης

Οι άμεσες μέθοδοι μετρήσεις (direct measurement methods) είναι εκείνες στις οποίες οι μετρήσεις των γωνιών και της επιφάνειας γίνονται απευθείας στα στοιχεία της φυτικής κόμης και συνήθως περιλαμβάνουν τις λεγόμενες καταστρεπτικές τεχνικές. Οι έμμεσες μέθοδοι μέτρησης (indirect measurement methods), σε γενικές

γραμμές, απαιτούν την ύπαρξη ενός μοντέλου που να συσχετίζει την απόκριση της φυτικής κόμης σε μια διεργασία π.χ στη διάδοση του φωτός μέσα στη φυτική κόμη, με τις παραμέτρους που περιγράφουν τη δομή της. Η απόκριση μετράται κάτω από κατάλληλες συνθήκες, και το μοντέλο με τη σειρά του χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της δομής της φυτικής κόμης. Οι ημι-άμεσες μέθοδοι μέτρησης (semidirect measurement methods) αποτελούν οριακές περιπτώσεις μεθόδων με μη διακριτή συνήθως κατηγοριοποίηση μεταξύ των άμεσων και των έμμεσων μεθόδων.

Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ο αυτοματοποιημένος αναλυτής φυτικής κόμης LAI-2000 (Plant Canopy Analyzer) της εταιρίας LI-COR, Lincoln, NE, USA, που κατηγοριοποιείται στις έμμεσες μεθόδους μέτρησης, και συγκεκριμένα στην τεχνική μελέτης των κενών της φυτικής κόμης (gap fraction analysis), περαιτέρω αναφορά της οποίας θα γίνει στη συνέχεια.

1.6.1 Οι μέθοδοι GF

Εναλλακτική λύση για την προσέγγιση των αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών της φυτικής κόμης αποτελούν οι έμμεσες μέθοδοι που προσεγγίζουν τη δομή της φυτικής κόμης χρησιμοποιώντας τεχνικές που βασίζονται σε σχετικά απλές μετρήσεις της διείσδυσης και της διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη φυτική κόμη. Σε όλες τις τεχνικές οι μετρήσεις μετατρέπονται σε δομική πληροφορία μέσα από μια διαδικασία αντιστροφής (inversion process). Πρόκειται για μια μαθηματική διαδικασία κατά την οποία η αρχική ανεξάρτητη μεταβλητή ενός συστήματος μετατρέπεται σε εξαρτημένη. Στην κατηγορία των έμμεσων μεθόδων, όπως προαναφέραμε ανήκουν και οι μέθοδοι που βασίζονται στη μελέτη των κενών της φυτικής κόμης (gap fraction methods - GFM).

Οι μέθοδοι GF αποτελούν ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την εκτίμηση παραμέτρων δομής της φυτικής κόμης, όπως ο LAI και η μέση γωνία κλίσης των φύλλων. Είναι κατάλληλες για τη μελέτη της δομής φυτικής κόμης με πλήρη κάλυψη (full cover canopies), τη μελέτη της φυτικής κόμης απομονωμένων φυτών (isolated single canopies), και ακόμα είναι κατάλληλες και για την περίπτωση ετερογενούς φυτικής κόμης (heterogenous canopies) (Norman & Campbell, 1989).

Η βασική ιδέα αυτών των μεθόδων είναι ο υπολογισμός του τμήματος της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά τη φυτική κόμη. Η μέτρησή του γίνεται ταυτόχρονα σε ένα εύρος ζενίθειων γωνιών. Στη συνέχεια η πληροφορία αυτή συγκρίνεται με θεωρητικές τιμές που έχουν προκύψει από διάφορους τύπους φυτικής κόμης και με δείκτες φυλλικής επιφάνειας και με τη βοήθεια στατιστικής προσαρμογής υπολογίζονται παράμετροι, όπως ο LAI και η γωνιακή κατανομή (Jones, 1992).

Η μετάδοση $T(\theta)$ της δέσμης της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια κάτω από τη φυτική κόμη για μια δεδομένη ζενίθεια γωνία θ , είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ποσοτικά με τη μέτρηση του τμήματος της συνολικής επιφάνειας των φύλλων που φωτίζονται από τις ηλιακές ακτίνες (total sunlit area). Η μέτρηση αυτή (gap fraction) πραγματοποιείται σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της φυτικής κόμης (transects) (εικόνα 1.6.1). Η εξίσωση, που συσχετίζει τα δομικά χαρακτηριστικά της φυτικής κόμης με την $T(\theta)$, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T(\theta) = e^{-k_{\theta}L} \quad (1.6.1.1)$$

όπου k_{θ} ο συντελεστής απόσβεσης της ηλιακής ακτινοβολίας, ζενίθειας γωνίας θ , από τη φυτική κόμη και L ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας. Οι μέθοδοι GF υποθέτουν τυχαία αζιμουθιακή κατανομή του φυλλώματος. Η υπόθεση αυτή ισχύει για τις περισσότερες καλλιέργειες και τύπους φυτικής κόμης (Ross, 1981). Από την εξίσωση 1.6.1.1 προκύπτει το μεταδιδόμενο τμήμα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη φυτική κόμη σε μια ζενίθεια γωνία θ , ως εξής (Nobel, Forseth & Long, 1993):

$$-\ln T(\theta) = k_{\theta}L \quad (1.6.1.2)$$

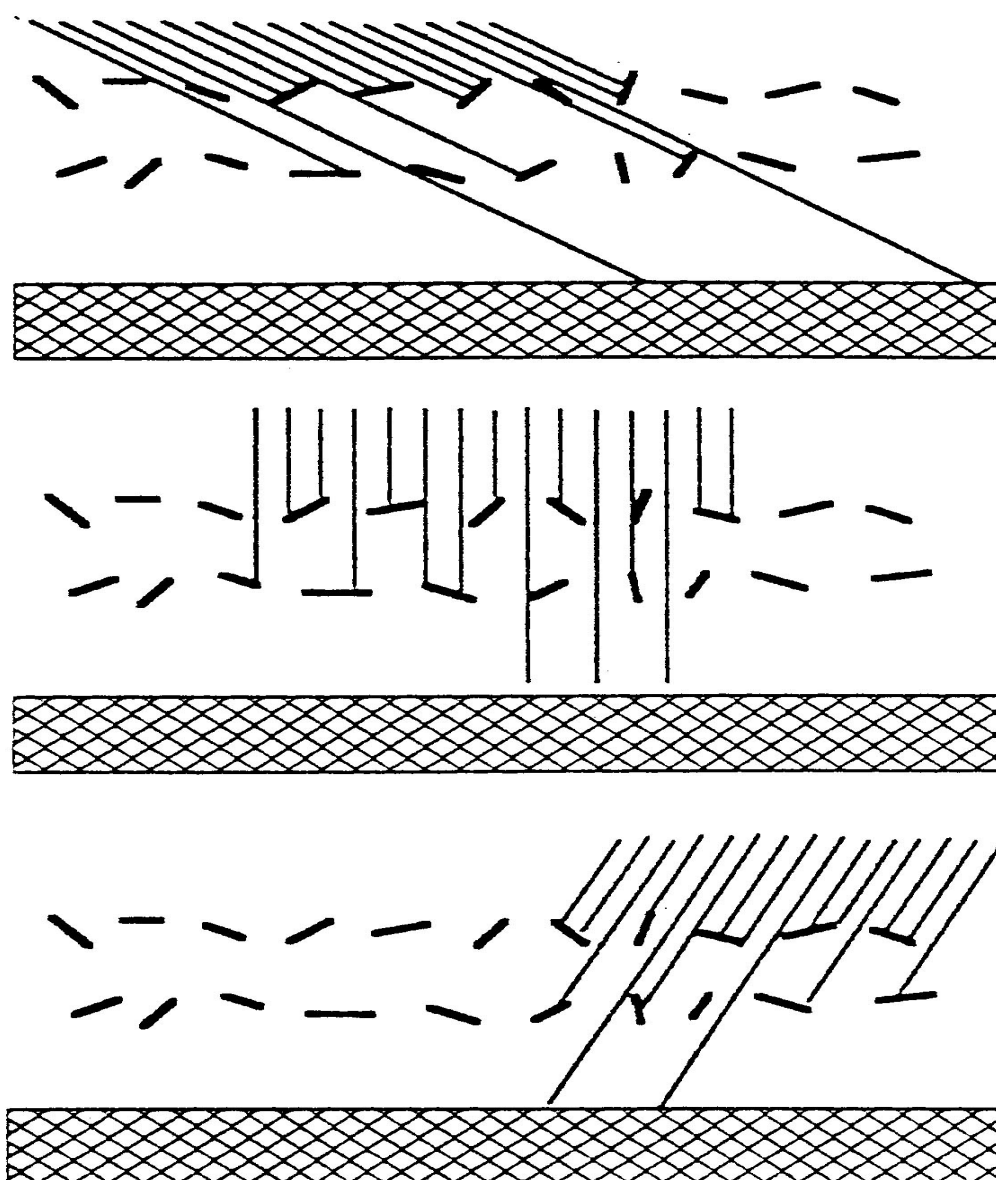
όπου

$$L = \sum_{j=1}^n f_j$$

n = ο αριθμός των κλάσεων των γωνιών των φύλλων

f_j = ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) σε μια κλάση γωνιών κλίσης j

k_{θ} = ο συντελεστής απόσβεσης της ηλιακής ακτινοβολίας, για μια ζενίθεια γωνία του ήλιου θ και για μια μέση γωνία κλίσης (MTA) του φυλλώματος α .



Εικόνα 1.6.1 Η διείσδυση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε μια ιδανική φυτική κόμη για τρεις διαφορετικές ζενίθειες γωνίες. Στο πάνω σχήμα $T(\theta) = 0,33$ για το δεύτερο στρώμα των φύλλων και $0,13$ στο επίπεδο του εδάφους. Στο μεσαίο σχήμα, οι τιμές αλλάζουν σε $0,53$ και $0,20$ αντίστοιχα, ενώ στο τρίτο σχήμα είναι $0,40$ και $0,13$. Οι παραπάνω τιμές συνδυασμένες με τις κατάλληλες ζενίθειες γωνίες χρησιμοποιούνται στη μέθοδο GF για τον προσδιορισμό του LAI και της μέσης γωνίας κλίσης του φυλλώματος της φυτικής κόμης (Nobel, Forseth & Long, 1993).

Έτσι, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της παραμέτρου $T(\theta)$ σε διάφορες ζενίθειες γωνίες του ήλιου, και με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων που δίνουν το συντελεστή απόσβεσης της ηλιακής ακτινοβολίας ως συνάρτηση της ζενίθειας γωνίας σε διαφορετικές κατανομές γωνιών φύλλων, είναι δυνατόν να πάρουμε εκτιμήσεις του

δείκτη φυλλικής επιφάνειας και τιμές της α , με μια διαδικασία αντιστροφής της εξίσωσης (1.6.1.2).

Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι για τη διαδικασία της αντιστροφής. Όλοι βασίζονται σε υποθέσεις γεωμετρίας της φυτικής κόμης. Η διαδικασία της αναστροφής κυρίως αναζητά τιμές της δομικής παραμέτρου x που δίνουν ικανοποιητική προσαρμογή στις μετρούμενες τιμές $T(\theta)$ στις διάφορες ζενίθειες γωνίες. Συνήθως, για την εκτίμηση του LAI επιλύεται ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων με αγνώστους τις τιμές των f_j , καθώς η παράμετρος $-\ln T(\theta)$ μετράται και οι τιμές των K_θ υπολογίζονται με μαθηματικά μοντέλα. Η μέση γωνία κλίσης του φυλλώματος υπολογίζεται με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων (συνήθως πολυώνυμα), που έχουν προκύψει από ιδανικούς τύπους φυτικής κόμης (Norman & Campbell, 1989, Welles & Norman, 1991).

Η απαραίτητη πληροφορία στις μεθόδους GF είναι δυνατόν να αποκτηθεί με μια σειρά τεχνικές όπως:

- Τη χρησιμοποίηση φωτογραφιών ημισφαιρικού τύπου (hemispherical photos), με λήψη, κάτω από καθαρές συνθήκες ουρανού, στο επίπεδο του εδάφους, για την εκτίμηση του τμήματος του ουρανού που είναι ορατό σε διαφορετικές γωνίες ανύψωσης του ήλιου (elevation angles).
- Τη χρησιμοποίηση του αυτοματοποιημένου αναλυτή φυτικής κόμης LAI-2000 Plant Canopy Analyzer.
- Τη χρησιμοποίηση του αναλυτή Decagon Devices Sunfleck Ceptometer για την εκτίμηση της επιφάνειας των ηλιακών κηλίδων μέσα στη φυτική κόμη.

1.7 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΚΟΜΗΣ ΚΑΙ Η ΠΡΟΣΛΗΨΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

1.7.1 Ο εκθετικός νόμος των Monsi & Saeki

Ένας από τους βασικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη διείσδυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη φυτική κόμη καλλιεργειών είναι η γωνία των φύλλων. Ωστόσο υπάρχει και μια σειρά άλλων παραγόντων όπως: α) οι ιδιότητες ακτινοβολίας των φύλλων (που επιδρούν στην ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας), β) το πάχος, το μέγεθος και το σχήμα των φύλλων, γ) ο βαθμός των καταστραμμένων φύλλων στη φυτική κόμη, δ) η κατακόρυφη και οριζόντια διάταξη της φυλλικής

επιφάνειας καθώς επίσης και παράγοντες όπως η ζενίθεια γωνία του ήλιου (ψ) ή αντίστοιχα η ανύψωση του ήλιου από τον ορίζοντα ($\beta = 90^\circ - \psi$) και η αναλογία της άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας κάθε χρονική στιγμή.

Όμως η περιγραφή της πρόσληψης της ηλιακής ακτινοβολίας από τη φυτική κόμη καλλιεργειών έχει επικρατήσει να συνδέεται με ένα μέγεθος: το συντελεστή απόσβεσης της ηλιακής ακτινοβολίας K . Ο συντελεστής αυτός αρχικά ορίστηκε μέσα από τον εκθετικό νόμο των Monsi & Saeki. Ο νόμος αυτός αποτελεί μια επέκταση του νόμου των Bouguer-Lambert-Beer. Ο τελευταίος περιγράφει τη διάδοση ενός μονοχρωματικού φωτός μέσα σε ένα ομογενές διάλυμα και αποτελεί όπως είναι γνωστό τη βάση των φασματοφωτομετρικών μεθόδων της χημικής ανάλυσης (Hay & Walker, 1989).

Με αντίστοιχο τρόπο ο νόμος των Monsi & Saeki είναι δυνατόν να εφαρμοστεί για μια σειρά από καλλιέργειες για να περιγράψει τη διάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη φυτική κόμη. Παράλληλα, ο νόμος αυτός, αποτέλεσε τη βάση για τη διαμόρφωση πολύπλοκων μοντέλων που προσεγγίζουν με καλύτερο τρόπο τη διάδοση και κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη φυτική κόμη.

Ο νόμος των Monsi & Saeki βασίζεται σε μια σειρά από απλουστεύσεις. Θεωρεί ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι σταθερή σε οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο μέσα στη φυτική κόμη μεταβαλλόμενη μόνο με το ύψος, καθώς δέχεται ότι η φυτική κόμη είναι κατά την οριζόντια διεύθυνση, ομοιόμορφα δομημένη (horizontally uniform). Έτσι αντιμετωπίζοντας τη φυτική κόμη ως ένα ομογενές μέσο, δέχεται ότι η ένταση της μέσης ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιοδήποτε επίπεδο αυτής παρουσιάζει την τάση της εκθετικής μείωσης με το ύψος (δηλαδή καθώς πλησιάζουμε προς το επίπεδο του εδάφους), με ένα τρόπο αντίστοιχο με τον νόμο των Bouguer-Lambert-Beer.

Ως απόρροια της παραπάνω παραδοχής επίσης δέχεται ότι η φυτική κόμη απαρτίζεται από περίπου οριζόντια φύλλα, με τυχαία διάταξη και χωρίς να υπάρχει σημαντική αλληλοεπικάλυψη μεταξύ αυτών. Έστω ότι μια τέτοια φυτική κόμη έχει ένα αθροιστικό δείκτη φυλλικής επιφάνειας L (η συνολική προβαλλόμενη φυλλική επιφάνεια ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους). Αν ισχύουν τα παραπάνω, τότε η φυτική κόμη είναι δυνατόν να διαιρεθεί σε έναν αριθμό οριζόντιων επιπέδων, που το κάθε ένα από αυτά περιέχει ισοδύναμες ποσότητες φυλλικής επιφάνειας. Εάν θεωρηθεί ότι ένα τέτοιο οριζόντιο επίπεδο περιέχει ένα δείκτη φυλλικής επιφάνειας dL , τότε αυτή η φυλλική επιφάνεια θα δέχεται μια ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας ίση με $I_0 dL$, όπου

I_0 η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα οριζόντιο επίπεδο στην κορυφή της φυτικής κόμης (Jones, 1992).

Εάν υποθεθεί επίσης ότι τα φύλλα προσομοιάζουν στη συμπεριφορά με μέλανα σώματα, δηλαδή απορροφούν όλη την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτά χωρίς να επιτρέπουν την παραπέρα διάδοση αυτής (opaque black leaves), τότε η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας (dI) καθώς διέρχεται μέσα από αυτό το επίπεδο της φυτικής κόμης, είναι ισοδύναμη με το γινόμενο $-I_0 dL$. Το αρνητικό πρόσημο χρειάζεται, αφού ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας αυξάνεται καθώς κινούμαστε από την κορυφή της φυτικής κόμης προς το επίπεδο του εδάφους. Ολοκληρώνοντας από $0-L$, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τη μέση ηλιακή ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια, πάνω από την οποία υπάρχει ένας δείκτης φυλλικής επιφάνειας L , από τη σχέση:

$$I = I_0 e^{-L} \quad (1.7.1.1)$$

Στην πραγματικότητα, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιοδήποτε επίπεδο μέσα στη φυτική κόμη προέρχεται από περιοχές όπου η ηλιακή ακτινοβολία δεν έχει εξασθενήσει (sunflecks) και από περιοχές που έχουν πλήρως σκιαστεί (shaded areas). Ο λόγος $I/I_0 = e^{-L}$ εκφράζει το τμήμα της φυλλικής επιφάνειας σε ένα επίπεδο της φυτικής κόμης, που είναι φωτιζόμενο από τον ήλιο (sunlit) (Jones, 1992). Το τμήμα αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$L_{\text{sunlit}} = 1 - (I/I_0) = 1 - e^{-L} \quad (1.7.1.2)$$

Η παραπάνω σχέση προσεγγίζει την τιμή 1 σε υψηλούς δείκτες φυλλικής επιφάνειας, υποδηλώνοντας ότι ο L_{sunlit} σε μια φυτική κόμη με οριζόντια φύλλα είναι περίπου ίσος με 1 (Jones, 1992).

1.7.2 Η διάδοση της διάχυτης ακτινοβολίας μέσα στη φυτική κόμη

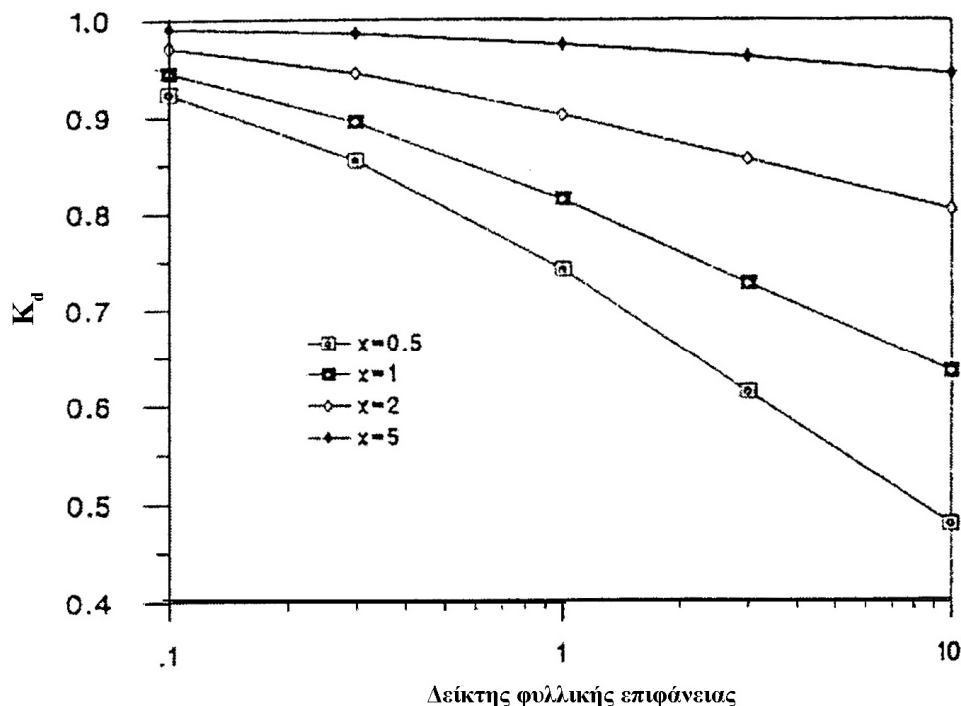
Η διάχυτη ακτινοβολία είναι η μικρού μήκους ακτινοβολία που προέρχεται από όλες τις διευθύνσεις και αποσβένεται από τη φυτική κόμη με τρόπο διαφορετικό σε σχέση με την άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προέρχεται από μια μόνο διεύθυνση. Έτσι η διάχυτη ακτινοβολία είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι προέρχεται από ένα σύνολο ακτινών, ενώ ο συντελεστής απόσβεσης της διάδοσης της υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\tau_d = 2 \int_0^{\pi/2} \tau_b(\psi) \sin \psi \cos \psi d\psi \quad (1.7.2.1)$$

Στην περίπτωση της φυτικής κόμης με οριζόντια φύλλα η παράμετρος $\tau_b(\psi)$ (το τμήμα της ηλιακής ακτινοβολίας (ζενίθειας γωνίας ψ) που διαπερνά την φυτική κόμη), δεν εξαρτάται από τη ζενίθεια γωνία ψ , οπότε ισχύει $\tau_d = \tau_b$ αλλά για όλες τις άλλες περιπτώσεις γωνιακών κατανομών, η παράμετρος $\tau_b(\psi)$ εξαρτάται από την ψ και η επίλυση της παραπάνω σχέσης θα πρέπει να γίνεται αριθμητικά. Όταν το παραπάνω ολοκλήρωμα επιλυθεί, τότε διαπιστώνεται ότι η παράμετρος τ_d δεν μειώνεται εκθετικά σε συνάρτηση με το δείκτη της φυλλικής επιφάνειας L , όπως συμβαίνει με την περίπτωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Campbell & Norman, 1998).

Με στόχο τη δημιουργία ενός μοντέλου οι εκθετικές σχέσεις προσαρμόζονται σε πειραματικές τιμές για να περιγράψουν την μεταβολή του συντελεστή απόσβεσης της διάχυτης ακτινοβολίας με τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Στην εικόνα 1.7.2 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα, που βασίζεται στον υπολογισμό του παραπάνω ολοκληρώματος για διαφορετικές κατανομές γωνιών φύλλων, υποθέτοντας αμετάβλητες συνθήκες νέφωσης στον ουρανό (μη ζενίθεια εξάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας). Έτσι για μια φυτική κόμη με οριζόντια φύλλα ο $K_d = 1$, ενώ στην περίπτωση μιας φυτικής κόμης με σφαιρική κατανομή και με $L_f = 3$ η τιμή του K_d είναι περίπου 0,7.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία, σε μια συγκεκριμένη περιοχή της φυτικής κόμης, σε αντίθεση με την άμεση, κατανέμεται με σχετικά ομοιόμορφο τρόπο προς όλα τα φύλλα της φυτικής κόμης ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό τους. Έτσι η ποσότητα της διάχυτης ακτινοβολίας (ποσότητα ακτινοβολούμενης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας) που φθάνει στην επιφάνεια ενός φύλλου, σε κάποιο βάθος (L) μέσα στη φυτική κόμη, είναι η ίδια με την ποσότητα της διάχυτης ακτινοβολίας που εκτιμάται σε ένα οριζόντιο επίπεδο στο ίδιο βάθος με τη βοήθεια της σχέσης (1.7.2.1) και με την ποσότητα της διάχυτης ακτινοβολίας στο επάνω μέρος της φυτικής κόμης (Campbell & Norman, 1998).



Εικόνα 1.7.2 Ο συντελεστής απόσβεσης της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας για διάφορους τύπους φυτικής κόμης που έχουν διαφορετικές κατανομές γωνιών φύλλων (Campbell & Norman, 1998).

Στην πραγματικότητα τα φύλλα της φυτικής κόμης επιτρέπουν τη μετάδοση και την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη φυτική κόμη, καθώς δεν αποτελούν μέλανα σώματα (black leaves). Εάν τα φύλλα της φυτικής κόμης έχουν μια απορροφητικότητα (a), τότε η συνολική ηλιακή ακτινοβολία (άμεση και σκεδαζόμενη) που μεταδίδεται μέσα στη φυτική κόμη μέχρι ύψους L είναι:

$$\tau_{bt}(\psi) = \exp(-\sqrt{a}K_{be}(\psi)L) \quad (1.7.2.2)$$

Από την παραπάνω σχέση μπορούμε να δούμε ότι όταν οι τιμές της a είναι μικρές, τότε η ηλιακή ακτινοβολία θα αποσβένεται λιγότερο μέσα στη φυτική κόμη. Η μετάδοση του φωτός μέσα από τη φυτική κόμη αποτελεί ένα μέτρο της ποσότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στο κάτω μέρος της φυτικής κόμης και που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και από τα κατώτερα στρώματα αυτής. Η σχέση 1.7.2.2 αποτελεί μια προσεγγιστική σχέση που λειτουργεί πολύ καλά για ένα εύρος ζενίθειων γωνιών του ήλιου, τύπων δομής της φυτικής κόμης και τιμών απορροφητικότητας των φύλλων.

Για μια φυτική κόμη με σφαιρική κατανομή των γωνιών των φύλλων, η παραπάνω σχέση αποτελεί μια καλή προσέγγιση, για ζενίθειες γωνίες μικρότερες των

65°. Η μετάδοση της διάχυτης ακτινοβολίας από τη φυτική κόμη περιγράφεται από μια παρόμοια εξίσωση θέτοντας όμως K_d ως συντελεστή απόσβεσης. Τυπικές τιμές α για την PAR και την ολική ηλιακή ακτινοβολία είναι 0,8 και 0,5 αντίστοιχα (Campbell & Norman, 1998).

1.7.3 Η εκτίμηση της ημερήσιας πρόσληψης της ηλιακής ακτινοβολίας από τη φυτική κόμη μιας καλλιέργειας

Σύμφωνα με τους Fuchs *et al.*, (1976) η πρόσληψη της άμεσης ακτινοβολίας και της διάχυτης ακτινοβολίας για μια ημέρα, είναι δυνατόν να προσεγγιστεί από την εξίσωση για τη διάχυτη ακτινοβολία. Η παραπάνω άποψη έχει επιβεβαιωθεί με ελέγχους που έχουν γίνει με αναλυτικά μοντέλα. Έτσι η μέση μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με τη βοήθεια της σχέσης 1.7.2.2 αντικαθιστώντας όπου $K_{be}(\psi)$ με K_d . Κατά αυτόν τον τρόπο η ημερήσια πρόσληψη της ηλιακής ακτινοβολίας είναι δυνατόν να εκτιμηθεί από την παρακάτω σχέση (Campbell & Norman, 1998):

$$f = 1 - \exp(-K_d \cdot L_t) \quad (1.7.3)$$

1.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας σε όλα τα στάδια ανάπτυξης μιας φυτικής καλλιέργειας αποτελεί μια πολύ βασική παράμετρος που μας δίνει πληροφορίες για τη δομή της φυτικής κόμης της καλλιέργειας. Η μέτρησή του πραγματοποιείται τόσο με άμεσες όσο και έμμεσες μεθόδους. Οι άμεσες μέθοδοι προσδιορισμού είναι πιο κοπιαστικές και χρονοβόρες σε σχέση με τις έμμεσες. Ειδικότερα σε ότι αφορά τη μέτρηση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας απαιτούν δειγματοληψία, κοπές φυτών και επιφανειομετρήσεις των φύλλων που είναι πολύ κουραστικές ειδικά σε μεγάλα φυτά και σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων. Αντίθετα οι έμμεσες μέθοδοι λόγω του αυτοματοποιημένου τους χαρακτήρα είναι σαφώς πιο σύντομες και λιγότερο κουραστικές.

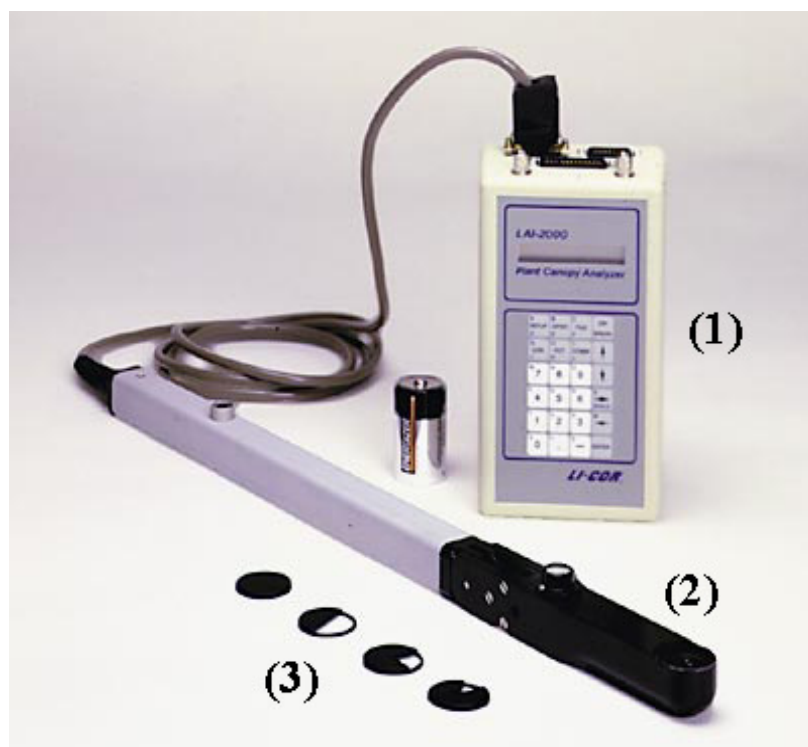
Για τον προσδιορισμό της μεταβολής του LAI με το χρόνο στην καλλιέργεια του γλυκού σόργου, χρησιμοποιήθηκε έμμεση τεχνική μέτρησης. Υπάρχουν διάφορα διαθέσιμα συστήματα για τον έμμεσο προσδιορισμό της δομής της φυτικής κόμης. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκε ο αυτοματοποιημένος αναλυτής φυτικής κόμης

LAI-2000 (Plant Canopy Analyzer) της εταιρίας LI-COR, Lincoln, NE, USA, που κατηγοριοποιείται στις έμμεσες μεθόδους μέτρησης και συγκεκριμένα στην τεχνική μελέτης των κενών της φυτικής κόμης (gap fraction analysis).

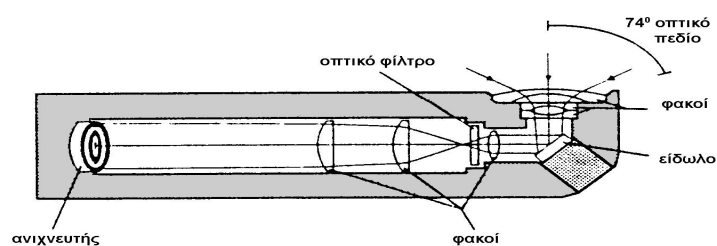
Το όργανο αυτό υπολογίζει το δείκτη φυλλικής επιφάνειας και άλλα δομικά χαρακτηριστικά της φυτικής κόμης, μέσα από μετρήσεις της απόσβεσης του φωτός στην φυτική κόμη, ταυτόχρονα για 5 καθορισμένες γωνίες, με τη βοήθεια οπτικού αισθητήρα. Το συνολικό οπτικό πεδίο του αισθητήρα είναι 148°, ενώ οι μετρήσεις της ακτινοβολίας που πραγματοποιούνται πάνω και κάτω από τη φυτική κόμη, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του LAI με τη βοήθεια ενός μαθηματικού μοντέλου, που περιγράφει τη μεταφορά και διάδοση της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου της φυτικής κόμης.

1.8.1 Περιγραφή του οργάνου - αναλυτής LAI-2000

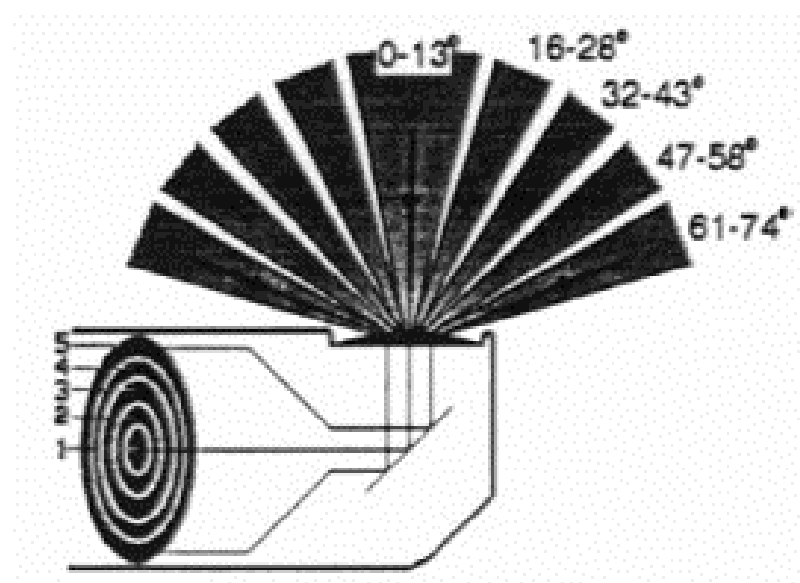
Ο αναλυτής φυτικής κόμης LAI-2000 είναι φορητός και αποτελείται από τον οπτικό αισθητήρα (LAI-2050 Optical sensor) και τη μονάδα ελέγχου (LAI-2070 Control Unit) (εικόνα 1.8.1.1). Ο οπτικός αισθητήρας απαρτίζεται από ημισφαιρικούς φακούς, τύπου fisheye, ένα οπτικό φίλτρο και ένα οπτικό σύστημα. Το οπτικό σύστημα περιλαμβάνει ένα κύκλωμα (circuit board) και έναν ειδικά κατασκευασμένο ανιχνευτή (detector) ακτινοβολίας (ανιχνευτής φωτοδιόδου). Οι φακοί, που είναι τοποθετημένοι μπροστά από τον ανιχνευτή, έχουν στο οπτικό τους πεδίο μια ημισφαιρική εικόνα την οποία εστιάζει το οπτικό σύστημα πάνω στον ανιχνευτή. Ο ανιχνευτής αποτελείται από μια ομάδα 5 δακτυλίων, με ομόκεντρη διάταξη (εικόνα 1.8.1.2). Κάθε ένας από τους δακτυλίους του φωτοανιχνευτή, “βλέπει” ένα διαφορετικό τμήμα της φυτικής κόμης ή του ουρανού, που εστιάζεται σε κάθε μια από τις 5 οπτικές γωνίες (view angles) (εικόνα 1.8.1.3).



Εικόνα 1.8.1.1 Ο αναλυτής φυτικής κόμης LAI-2000 με τη μονάδα ελέγχου (1), τον οπτικό αισθητήρα (2) και τους οπτικούς παρεμποδιστές (3). [http://www.licor.com/env/Products/AreaMeters/lai2000/2000_intro.jsp].



Εικόνα 1.8.1.2 Σχηματική απεικόνιση του ακραίου τμήματος του οπτικού ανιχνευτή (επάνω) και η πραγματική εικόνα (κάτω). [2].



Εικόνα 1.8.1.3 Ο σχεδιασμός του οπτικού αισθητήρα του αναλυτή LAI-2000. Ο αισθητήρας έχει σχεδόν ένα ημισφαιρικό οπτικό πεδίο με μια ζενίθεια γωνία που σταματά στις 74°. Η ακτινοβολία προβάλλεται σε πέντε ανιχνευτές τακτοποιημένους σε συγκεντρωτικούς δακτύλιους, όπου ο καθένας αντιπροσωπεύει το τμήμα του ημισφαιρίου που καθορίζεται από τη ζενίθεια γωνία [3].

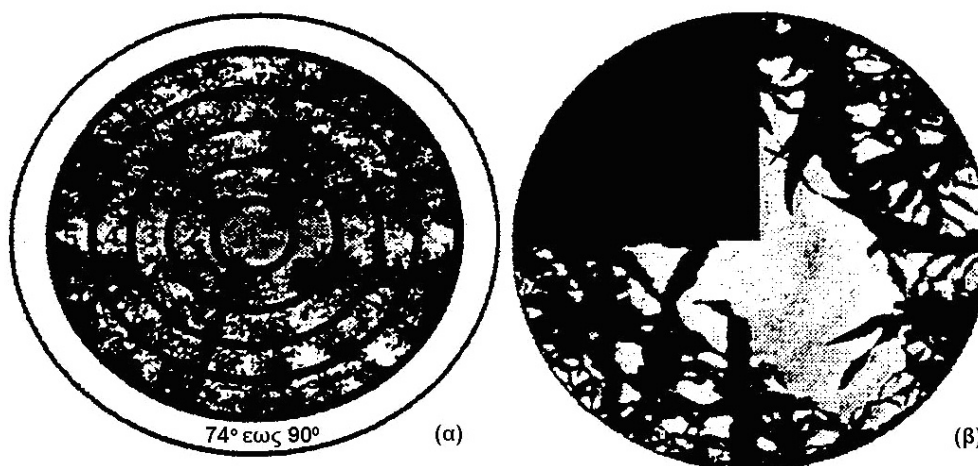
Πιο συγκεκριμένα, ο κάθε δακτύλιος του ανιχνευτή παρουσιάζει απόκριση σε ένα διαφορετικό εύρος από ζενίθειες γωνίες (1.8.1.4). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται το εύρος των γωνιών που καλύπτει ο κάθε δακτύλιος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει απόκριση στις ζενίθειες γωνίες μεταξύ των 74° και 90°.

Πίνακας 1.8.1 Το εύρος των γωνιών των δακτυλίων του ανιχνευτή.

| | Εύρος γωνιών δακτυλίων |
|-------------|------------------------|
| Δακτύλιος 1 | 0,0 - 12,3° |
| Δακτύλιος 2 | 16,7 - 28,6° |
| Δακτύλιος 3 | 32,4 - 43,4° |
| Δακτύλιος 4 | 47,3 - 58,1° |
| Δακτύλιος 5 | 62,3 - 74,1° |

Το εύρος απόκρισης του οπτικού ανιχνευτή είναι η περιοχή ανάμεσα στα 320-490 nm. Στον οπτικό ανιχνευτή περιλαμβάνεται επίσης και ένα φίλτρο, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στο σύστημα των φακών (εικόνα 1.8.1.2). Το οπτικό φίλτρο, δεν

επιτρέπει σε φως με μήκος ακτινοβολίας πάνω από τα 490 nm να περάσει, ελαχιστοποιώντας με τον τρόπο αυτόν τη συνεισφορά της ακτινοβολίας που ανακλάται και εκπέμπεται από τα φύλλα (490-650 nm:<1% και >650 nm:<0,1%). Η συνεισφορά της ακτινοβολίας αυτής είναι πολύ χαμηλή και ασήμαντη κάτω από τα 490 nm. Το οπτικό φίλτρο έχει επίσης ως αποτέλεσμα τα φύλλα να “φαίνονται μαύρα” συγκρινόμενα με το φωτεινότερο χρώμα του ουρανού.

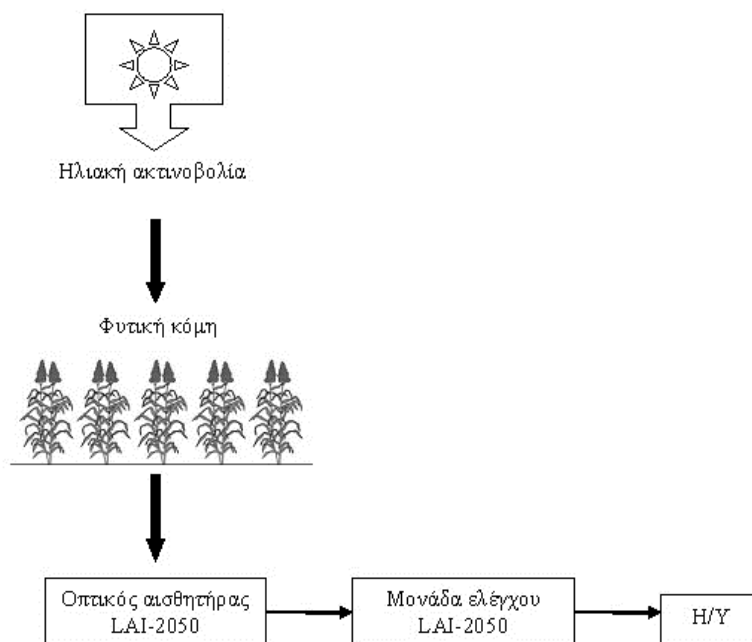


Εικόνα 1.8.1.4 Το οπτικό πεδίο των δακτυλίων του οπτικού ανιχνευτή α) σε δάσος και β) σε καλλιέργεια αραβόσιτου. Στην εικόνα β έχει χρησιμοποιηθεί οπτικός παρεμποδιστής 45° [2].

Η μονάδα ελέγχου συλλέγει τα δεδομένα του οπτικού αισθητήρα και πραγματοποιεί τους απαραίτητους υπολογισμούς για τον προσδιορισμό του LAI της φυτικής κόμης της καλλιέργειας. Οι μετρήσεις του οπτικού αισθητήρα αφορούν μετρήσεις της διάχυτης ακτινοβολίας και όχι της άμεσης. Για αυτό και οι μετρήσεις είναι ανεξάρτητες των συνθηκών νέφωσης στον ουρανό (νεφοσκεπής ή καθαρός ουρανός). Γενικά όμως είναι καλύτερο οι μετρήσεις να γίνονται κάτω από μουντό ουρανό (δηλαδή όταν κυριαρχεί η διάχυτη ακτινοβολία) ή κατά τις απογευματινές ώρες της ημέρας, όπου η άμεση ακτινοβολία είναι μειωμένη.

Η βασική τεχνική του αναλυτή συνδυάζει τη μέτρηση της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επάνω μέρος της φυτικής κόμης με μια σειρά από μετρήσεις της ακτινοβολίας κάτω από τη φυτική κόμη. Το τμήμα της ακτινοβολίας που προσλαμβάνεται από τη φυτική κόμη (intercepted radiation) υπολογίζεται ως ένα κλάσμα αυτών των μετρήσεων. Ο λόγος των μετρήσεων (κάτω μέτρηση / επάνω

μέτρηση) του κάθε δακτυλίου εκφράζει το τμήμα των κενών της φυτικής κόμης (canopy's gap fraction) που αντιστοιχεί στο οπτικό πεδίο που καλύπτει ο κάθε δακτύλιος του ανιχνευτή. Οι λόγοι αυτοί (gap fractions) μετατρέπονται στη μονάδα ελέγχου σε τιμές LAI με τη βοήθεια μιας μεθόδου που βασίζεται στους τύπους του Miller (1967) που συνδέουν ζενίθειες γωνίες με το τμήμα των κενών (Welles & Norman, 1991) (εικόνα 1.8.1.5).



Εικόνα 1.8.1.5 Το σύστημα μέτρησης.

1.8.2 Υποθέσεις λειτουργίας του αναλυτή LAI-2000

Υπάρχουν κάποιες υποθέσεις βάση των οποίων λειτουργεί ο αναλυτής LAI-2000. Αυτές θα πρέπει να ισχύουν ώστε οι υπολογισμοί του δείκτη φυλλικής επιφάνειας να είναι σωστοί. Ο βαθμός στον οποίο παραβιάζονται επηρεάζει την αξιοπιστία των μετρήσεων. Οι τέσσερις βασικές υποθέσεις, που αφορούν στη μετατροπή των δεδομένων μελέτης των κενών (gap fraction data) της φυτικής κόμης σε ‘δομική πληροφορία’, κατά σειρά σημαντικότητας, είναι οι ακόλουθες (Welles & Norman, 1991, [1], [2], [3]):

- Μόνο η διάχυτη ακτινοβολία μετράτε από τον οπτικό αισθητήρα στο κάτω μέρος της φυτικής κόμης, καθώς η ακτινοβολία που προσπίπτει στο φύλλωμα απορροφάτε από αυτό. Έχει γίνει δηλαδή η υπόθεση ότι οι μετρήσεις που

αφορούν το κάτω μέρος της φυτικής κόμης δεν περιλαμβάνουν την ακτινοβολία που έχει ανακλαστεί ή έχει εκπέμψει από το φύλλωμα.

- Το φύλλωμα βρίσκεται με τυχαίο τρόπο τοποθετημένο στη φυτική κόμη (randomly positioned foliage). Οι χώροι (foliage - containing envelopes) που καταλαμβάνει το φύλλωμα είναι δυνατόν να έχουν το σχήμα “παράλληλων σωλήνων” (π.χ. μια καλλιέργεια σε σειρά), να έχουν ελλειψοειδή μορφή (π.χ. ένας θάμνος), την ενιαία μορφή ενός “απέραντου χώρου” (π.χ. αγρωστώδη φυτά, ποώδης βλάστηση), ή ενός χώρου με ανοίγματα (π.χ. δάσος φυλλοβόλων).
- Τα στοιχεία του φυλλώματος είναι μικρά συγκρινόμενα με την επιφάνεια του οπτικού πεδίου των δακτυλίων. Ένας πολύ βασικός εμπειρικός κανόνας που ισχύει στην υπόθεση αυτή είναι ο ακόλουθος: σε μια ζενίθεια γωνία 30° η απόσταση από τον αισθητήρα μέχρι το κοντινότερο φύλλωμα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τέσσερις φορές το πλάτος του φύλλου.
- Το φύλλωμα παρουσιάζει τυχαία κατανομή ως προς το αζιμούθιο, δηλαδή παρουσιάζει τυχαίο προσανατολισμό. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχει σημασία για τις μετρήσεις η κλίση του φυλλώματος αρκεί όλα τα φύλλα να μη στρέφονται προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτός ο αζιμούθιος προσανατολισμός του φυλλώματος αποτελεί μια βασική υπόθεση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης κλίσης των φύλλων (MTA).

Η πρώτη υπόθεση επαληθεύεται καλύτερα κάτω από συνθήκες νέφωσης, όπου υπερिσχύει η διάχυτη ακτινοβολία της άμεσης. Σε αντίθετη περίπτωση τα φύλλα της φυτικής κόμης που φωτίζονται από τον ήλιο (sunlit leaves) αναμένεται να αυξήσουν την ποσότητα της διάχυτης ακτινοβολίας μέσα στη φυτική κόμη και να μειώσουν την τιμή του LAI που εκτιμά το όργανο (Welles & Norman, 1991).

Στην πραγματικότητα καμία φυτική κόμη δεν εκπληρώνει τις παραπάνω υποθέσεις. Το φύλλωμα δεν παρουσιάζει πάντα τυχειότητα ως προς την κατανομή, αλλά συνήθως στα περισσότερα φυτικά είδη είναι συγκεντρωμένο κατά μήκος του βλαστού ή του στελέχους, ενώ τα στοιχεία αυτού δημιουργούν φαινόμενα ανάκλασης καθώς δεν απορροφούν όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτά. Πολλά είδη εμφανίζουν κάποιο βαθμό ηλιοτροπισμού, γεγονός που παραβιάζει την υπόθεση για οριζόντια τυχαία κατανομή του φυλλώματος (azimuthal randomness assumption).

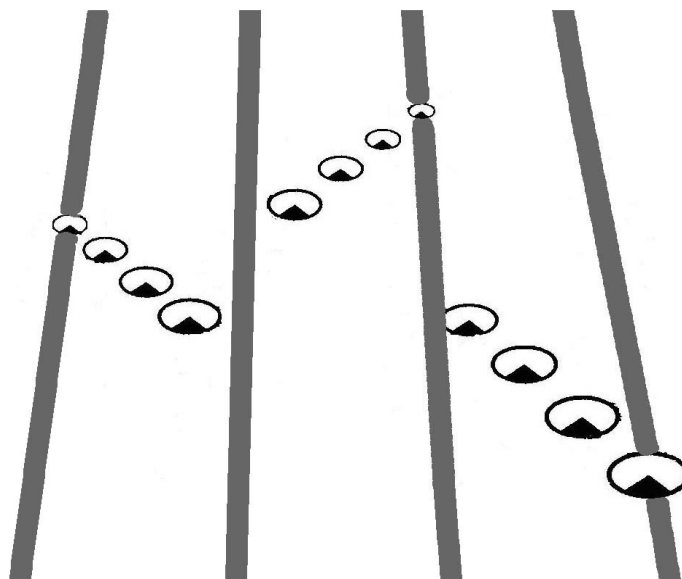
Ωστόσο, οι πρακτικοί συμβιβασμοί στους οποίους οδηγούμαστε, στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν ενέχουν μεγάλο ποσοστό λάθους. Τελικώς η κατανομή της φυτικής κόμης σε πολλά είδη είναι δυνατόν να χαρακτηριστεί τυχαία, καθώς επίσης είναι δυνατόν να δεχτούμε με ασφάλεια πως το “υγιές φύλλωμα” (living foliage) παρουσιάζει πολύ μικρή διαπερατότητα και αντανακλαστικότητα κάτω από τα 490 nm.

Εκεί βέβαια που τα απόλυτα σφάλματα μέτρησης δεν μπορούν να αγνοηθούν (π.χ. στην περίπτωση των κωνοφόρων, φυτικών καλλιέργειών σε τελικό στάδιο και σε φυτά με λεπτά, γηρασμένα και ανοιχτόχρωμα φύλλα, καθώς και σε καλλιέργειες με μεγάλα κενά), καλό είναι να ελέγχουμε τα αποτελέσματα και με άμεσες μεθόδους προσδιορισμού.

1.8.3 Πραγματοποίηση των μετρήσεων με τον αναλυτή LAI-2000

Πρακτικά, απαιτείται η λήψη πολλαπλών μετρήσεων κάτω από τη φυτική κόμη μιας καλλιέργειας για την εξασφάλιση μιας αντιπροσωπευτικής εικόνας του μετρούμενου χώρου. Ο αριθμός αυτών των μετρήσεων εξαρτάται από την ετερογένεια της φυτικής κόμης και από το μέγεθος της μετρούμενης περιοχής και έχει πάντα ως στόχο την αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων. Ειδικότερα σε καλλιέργειες που αναπτύσσονται κατά μήκος γραμμών μια πολύ καλή τεχνική για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στο κάτω μέρος της φυτικής κόμης (B μετρήσεις) είναι η παρακάτω.

Πραγματοποιούμε την πρώτη μέτρηση στη βάση της φυτικής κόμης και τις υπόλοιπες κατά μήκος μιας διαγώνιου, ανάμεσα από δύο γραμμές της καλλιέργειας, και σε ισομήκη διαστήματα (σχήμα 1.8.3.1). Συνιστώνται 4-6 μετρήσεις κατά μήκος της διαγώνιου, καθώς και παρόμοιες μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία μέσα στην καλλιέργεια. Ο λόγος της διαγώνιας κίνησης κατά μήκος των γραμμών της καλλιέργειας είναι για μην κυριαρχούν τα ίδια φυτά, όπως τα αντιλαμβάνεται το οπτικό πεδίο του αναλυτή, στην ομάδα των μετρήσεων στο κάτω μέρος της φυτικής κόμης. Ο χρόνος που διαρκεί η κάθε μέτρηση κυμαίνεται μεταξύ κάποιων δευτερολέπτων και έτσι ο χρόνος που απαιτείται για τον προσδιορισμό μιας μέσης τιμής του LAI σε μικρού μεγέθους φυτική κόμη είναι περίπου ένα με δυο λεπτά (Welles & Norman, 1991, [2]).



Εικόνα 1.8.3.1 Παράδειγμα πραγματοποίησης πολλαπλών B μετρήσεων σε γραμμικές καλλιέργειες με τον αναλυτή LAI-2000 [2].

Θεωρητικά, οι κάτω μετρήσεις (B μετρήσεις) θα πρέπει να είναι πάντα μικρότερες από τις πάνω μετρήσεις (A μετρήσεις). Σε πολύ αραιό φύλλωμα οι τιμές τους θα είναι πολύ κοντινές, ενώ στις περιπτώσεις με μεγάλα κενά στην καλλιέργεια, όπου ο αισθητήρας βλέπει πολύ λιγότερο φύλλωμα, θα είναι οι ίδιες ακριβώς. Αλλά αυτό ισχύει μόνο στη θεωρία. Στην πράξη, η B μέτρηση μπορεί να υπερβαίνει την A μέτρηση για έναν από τους ακόλουθους λόγους:

- Αλλαγές στις κλιματολογικές συνθήκες.
- Φυσιολογικές αποκλίσεις στις μετρήσεις.
- Σφάλμα του χειριστή (λανθασμένη σειρά των μετρήσεων).
- Κάνοντας B μετρήσεις σε ηλιόλουστο φύλλωμα (σφάλμα του χειριστή).

Υπάρχουν περιπτώσεις κατά τη μέτρηση όπου είναι καλύτερο να εμποδίζουμε τον οπτικό αισθητήρα από το να “βλέπει” και τις 360° του αζιμουθίου. Αυτό συνήθως γίνεται για ειδικούς σκοπούς, π.χ. όταν επιθυμούμε να βγάλουμε από το οπτικό πεδίο μη επιθυμητά αντικείμενα ή την επίδραση της παρουσίας του χειριστή, και έχει ως στόχο την αποφυγή σφαλμάτων [3]. Επίσης πραγματοποιείται όταν θέλουμε να μελετήσουμε μια φυτική κόμη που διατηρεί φύλλα με ασύμμετρη κατανομή ως προς το αζιμούθιο. Για να γίνει κάτι τέτοιο χρησιμοποιούνται οπτικοί παρεμποδιστές (view restrictors), που εφαρμόζονται στον οπτικό ανιχνευτή (εικόνα

1.8.3.2). Ένας τέτοιος οπτικός παρεμποδιστής είναι απλά ένα κυκλικό κάλυμμα όπου μόνο μια γωνιώδης (π.χ 45°, 90°, 180° και 270°) περιοχή αυτού είναι ανοικτή. Συνήθως χρησιμοποιείται ο οπτικός παρεμποδιστής των 45° για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης στις μετρήσεις της παρουσίας του χειριστή του οργάνου [2].



Εικόνα 1.8.3.2 Ο οπτικός αισθητήρας LAI-2050 με τους οπτικούς παρεμποδιστές. Όπως φαίνεται ο οπτικός παρεμποδιστής των 270° έχει εγκατασταθεί στον αισθητήρα. [2].

2

ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η δομή της φυτικής (canopy structure) μιας καλλιέργειας, διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο σε μια σειρά από φυσιολογικές διεργασίες, ενώ παράλληλα αντιπροσωπεύει και ένα σημαντικό τμήμα της περιγραφής της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην φυτοκοινωνία και το περιβάλλον. Η γνώση παραμέτρων της δομής είναι αναγκαία για την περιγραφή της πρόσληψης και της διάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας από τα στοιχεία της φυτικής κόμης (Ross, 1981) και για την εκτίμηση της παραγωγικότητας μιας καλλιέργειας (deWit, 1965).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Leaf area index) ως βασικού δείκτη για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ανάπτυξης μιας καλλιέργειας. Η γνώση των μεταβολών του δείκτη, καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας, αποτελεί ένα μέτρο της παραγωγικότητάς της, καθώς και ένα τρόπο για την κατανόηση και παρακολούθηση οντογενετικών αλλαγών και χαρακτηριστικών ανάπτυξης.

Συγκεκριμένα μελετήθηκε η εξέλιξη του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με το χρόνο, σε καλλιέργεια γλυκού σόργου με συμβατική και βιολογική διαχείριση κάτω από την επίδραση δυο διαφορετικών επιπέδων στάγδην άρδευσης. Η σύγκριση των άριστων τιμών που λαμβάνει ο LAI κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας βοηθά στη διεξαγωγή των απαραίτητων αποτελεσμάτων σχετικά με την εύρεση του καταλληλότερου τρόπου ανάπτυξης της καλλιέργειας του γλυκού σόργου. Για τη μέτρηση του LAI επιλέχθηκε η έμμεση μέθοδος GF, που εκτιμά τον LAI, μέσα από την μελέτη των κενών της φυτικής κόμης, συνδέοντας την ικανότητα της διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην καλλιέργεια με την δομή αυτής.

3

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 ΘΕΣΗ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Τα πειράματα έγιναν σε αγρόκτημα στο χώρο του Πανεπιστημίου Πατρών (θέση: γεωγραφικό πλάτος: 38° 25' Β, γεωγραφικό μήκος: 21° 8' Α) την περίοδο 2003-2004. Το πείραμα περιλάμβανε δυο μπλοκ με δυο χειρισμούς σε τρεις επαναλήψεις. Το χειρισμό συμβατικής διαχείρισης της καλλιέργειας και το χειρισμό βιολογικής διαχείρισης. Οι επαναλήψεις στα έξι πειραματικά τεμάχια του κάθε μπλοκ τοποθετήθηκαν τυχαία κατόπιν κλήρωσης. Στο κάθε μπλοκ εφαρμόστηκε διαφορετικό επίπεδο άρδευσης (I_1 , I_2). Τα πειραματικά τεμάχια είχαν διαστάσεις 7x7 m² και απείχαν μεταξύ τους 2 m. Στην εικόνα 3.1 φαίνεται το σχέδιο τοποθέτησης των χειρισμών στα δύο μπλοκ της καλλιέργειας του γλυκού σόργου.

| | | | | | | |
|-------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| I_2 | T ₇ ΟΡΓ.ΟΥΣ. Σ E.Y. LAI | T ₈ ΟΡΓ.ΟΥΣ. B E.Y. LAI | T ₉ ΟΡΓ.ΟΥΣ. Σ | T ₁₀ ΟΡΓ.ΟΥΣ. Σ | T ₁₁ ΟΡΓ.ΟΥΣ. B | T ₁₂ ΟΡΓ.ΟΥΣ. B |
| | I_1 | T ₁ ΟΡΓ.ΟΥΣ. Σ | T ₂ ΟΡΓ.ΟΥΣ. Σ E.Y. LAI | T ₃ ΟΡΓ.ΟΥΣ. B E.Y. LAI | T ₄ ΟΡΓ.ΟΥΣ. B | T ₅ ΟΡΓ.ΟΥΣ. Σ |

T_{1,2...12}: αρίθμηση πειραματικών τεμαχίων

Σ: συμβατική διαχείριση της καλλιέργειας

B: βιολογική διαχείριση της καλλιέργειας

L.A.I.: μέτρηση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας

E.Y.: μέτρηση της εδαφικής υγρασίας

ΟΡΓ.ΟΥΣ.: δείγματα εδάφους για προσδιορισμό της οργανικής ουσίας

I_1 : επίπεδο άρδευσης (145mm)

I_2 : επίπεδο άρδευσης (45mm)

Εικόνα 3.1 Σχηματική απεικόνιση των πειραματικών τεμαχίων και επεξήγηση των διαφόρων χειρισμών και μετρήσεων σε αυτά.

3.2 ΕΔΑΦΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΤΕΜΑΧΙΩΝ

Από την κοκκομετρική ανάλυση, κατά την περίοδο 2002-2003, σε δείγματα εδάφους από όλα τα πειραματικά τεμάχια, 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 και 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 του εδάφους μετρήθηκε με τη μέθοδο της αποτέφρωσης (loss on ignition-L.O.I.) κατά την έναρξη της καλλιέργειας την περίοδο 2003-2004 και βρέθηκε στα δείγματα εδάφους για βάθος 0-30 cm, για τα μεν πειραματικά τεμάχια με τη συμβατική διαχείριση 1,1% κατά μέσο όρο, ενώ για τα πειραματικά τεμάχια με τη βιολογική διαχείριση 1,3% κατά μέσο όρο.

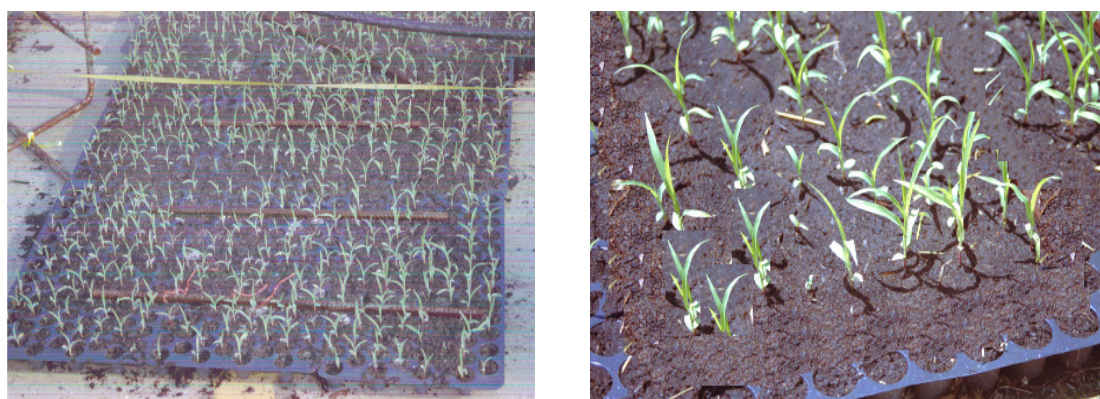
3.3 ΕΙΔΗ ΑΥΤΟΦΥΩΝ ΦΥΤΩΝ ΣΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΤΕΜΑΧΙΑ

Τα είδη της αυτοφυούς βλάστησης που αναπτύχθηκαν στα πειραματικά τεμάχια ήταν: *Amaranthus retroflexus*, *Amaranthus albus*, *Chenopodium vulvaria*, *Cichorium intybus*, *Conyza bonariensis*, *Foeniculum vulgare*, *Heliotropium europaeum*, *Inula viscose*, *Malva silvestris*, *Mentha spicata* sp., *Oryzopsis miliaca*, *Phragmites australis*, *Plantago*, *Rosmarinus officinalis*, *Rubus*, *Solanum nigrum*, *Verbascum*, *Verbena officinalis*.

3.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ

Η καλλιεργητική περίοδος άρχισε στις 15/11/2003 με φρεζάρισμα του εδάφους και σπορά του ψυχανθούς φυτού βίκου (*Vicia sativa* L.) (σε ποσότητα 14Kg σπόρου/στρέμμα) στα πειραματικά τεμάχια που έγινε βιολογική διαχείριση. Τον Απρίλιο του επόμενου έτους όταν ο βίκος είχε πλήρως ανθήσει έγινε ενσωμάτωση της χλωρής βιομάζας στο έδαφος. Παράλληλα στα υπόλοιπα πειραματικά τεμάχια

έγινε ενσωμάτωση της βιομάζας της αυτοφυούς βλάστησης στο έδαφος με το φρεζάρισμα. Κατά τη διάρκεια του Μαΐου και πιο συγκεκριμένα στις 21 Μαΐου 2004 (ημερολογιακή ημέρα 142) έγινε η σπορά σε μικρά πλαστικά δοχεία σε καρτέλες (jiftypots) (ένας σπόρος ανά δοχείο σε βάθος 1cm περίπου) με υπόστρωμα τύρφης τύπου Βαλτικής με βάση το *sphagnum* (εικόνα 3.4.1). Το πολλαπλασιαστικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν σπέρματα γλυκού σόργου ποικιλίας Keller [*Sorghum bicolor* (L.) Moench, cv. Keller]. Η ανάδυση των πρώτων φυτών έγινε στις 24 Μαΐου (ημερολογιακή ημέρα 145), ενώ η ανάδυση όλων των φυτών ολοκληρώθηκε στο τέλος του ίδιου μήνα (ημερολογιακή ημέρα 152).



Εικόνα 3.4.1 Σπορεία για παραγωγή σπορόφυτων γλυκού σόργου. (Από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών).

Ένα δεκαπενθήμερο πριν τη μεταφύτευση (ημερολογιακή ημέρα 145) προστέθηκε το λίπασμα στα πειραματικά τεμάχια με τη συμβατική διαχείριση. Λίπανση έγινε και στα αντίστοιχα τεμάχια με τη βιολογική διαχείριση, ενώ επιπλέον έγινε και εμπλουτισμός του εδάφους με 300 lt τύρφης ίδιου τύπου με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στη σπορά. Ακολούθησε νέο φρεζάρισμα για ενσωμάτωση τόσο της αυτοφυούς βλάστησης όσο και των λιπασμάτων που προστέθηκαν. Στη συνέχεια έγινε η τελική χάραξη των πειραματικών τεμαχίων και των γραμμών φύτευσης. Κατά μήκος των γραμμών της καλλιέργειας τοποθετήθηκαν οι σωλήνες στάγδην άρδευσης και ακολούθησε η σταδιακή φύτευση των σπορόφυτων.

Η φύτευση πραγματοποιήθηκε κατά μήκος 11 γραμμών του κάθε πειραματικού τεμαχίου και σε απόσταση 0,20 m επί των γραμμών τους (εικόνα 3.4.2). Οι αποστάσεις μεταξύ των γραμμών φύτευσης ήταν 0,70 m, ενώ η πυκνότητα εκτιμάται σε περίπου 7 φυτά ανά τετραγωνικό μέτρο. Ο αριθμός των φυτών ανά

πειραματικό τεμάχιο εκτιμάται περίπου σε 340. Η φύτευση ολοκληρώθηκε στις 8 Ιουνίου (ημερολογιακή ημέρα 160).



Εικόνα 3.4.2 Οι γραμμές της καλλιέργειας του γλυκού σόργου. (Από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών).

Στις αρχές Αυγούστου ολοκληρώθηκε το λεγόμενο κλείσιμο της φυτικής κόμης (canopy closure) (εικόνα 3.4.3), ενώ μετά τα μέσα του ίδιου μήνα 18 Αυγούστου (ημερολογιακή ημέρα 231) ξεκίνησε η άνθηση των φυτών της καλλιέργειας, που ολοκληρώθηκε σε όλα τα πειραματικά τεμάχια μέσα στο πρώτο δεκαήμερο του Σεπτεμβρίου (ημερολογιακή ημέρα 252).



Εικόνα 3.4.3 Η καλλιέργεια των φυτών γλυκού σόργου μετά το κλείσιμο της φυτικής κόμης (canopy closure). (Από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών).

3.5 Η ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΙΤΩΝ

Η καλλιέργεια προσβλήθηκε από τα παρακάτω έντομα τα οποία αντιμετώπιστηκαν με χειρονακτική εκκαθάριση από τον αγρό:

- Την προνύμφη ενός εδαφόβιου κολεόπτερου [*Anacentrinus deplanatus* (Casey)] στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των φυτών (εικόνα 3.5.1)
- Τις αφίδες του καλαμποκιού [*Rhopalosiphum maidis* (Fitch) και *Schizophis graminum* (Rondanis)] στα νεαρά κυρίως φύλλα (εικόνα 3.5.2), και
- Την προνύμφη της *Sesamia nonagriodes* (Lef) που προσβάλλει τα στελέχη κυρίως κατά τον Αύγουστο (εικόνες 3.5.3 και 3.5.4).

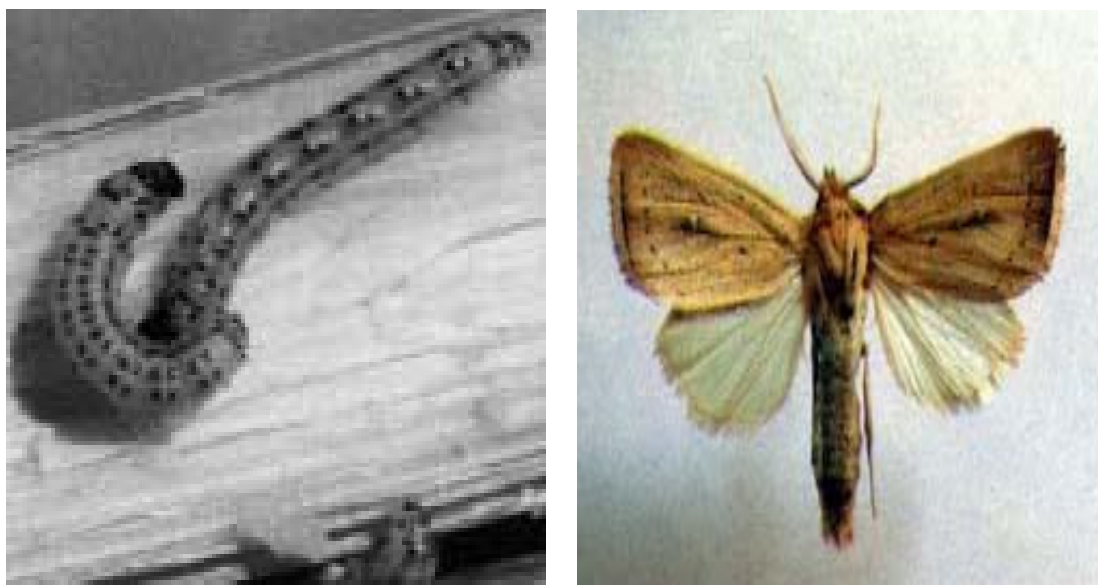
Οι εικόνες που ακολουθούν προέρχονται από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιέργειών του Πανεπιστημίου Πατρών και από δικτυακές πηγές.



Εικόνα 3.5.1 (αριστερά) Η προνύμφη *Anacentrinus deplanatus* (Casey), (δεξιά) Προσβολή της κορυφής από την προνύμφη *Anacentrinus deplanatus* (Casey). [<http://insects.tamu.edu:7998/imagedb/search.html>].



Εικόνα 3.5.2 Αφίδες καλαμποκιού *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) και *Schizophis graminum* (Rodanis) στα νεαρά κυρίως φύλλα του γλυκού σόργου.



Εικόνα 3.5.3 (αριστερά) Η προνύμφη *Sesamia nonagrioides* (Lef) [<http://www.nda.agric.za/docs/Sorghum/sorghum.htm>], (δεξιά) Το ακμαίο έντομο της προνύμφης *Sesamia nonagrioides* [<http://www.pherobase.com/database/species-Sesamia-nonagrioides.html>].



Εικόνα 3.5.4 Προσβολή στελέχους γλυκού σόργου από την προνύμφη *Sesamia nonagrioides* (Lef). [<http://muextension.missouri.edu/explore/agguides/pests/g07113.htm>].

Για την αντιμετώπισή τους χρησιμοποιήθηκε το επιτρεπόμενο στη βιολογική καλλιέργεια σκεύασμα ΟΙΚΟΣ 32EC (εντομοκτόνο φυτικής προέλευσης) με δραστική ουσία την αζαδιραχτίνη 3,2% (*Azadirachtin*). Επίσης τα φύλλα και οι βλαστοί προσβλήθηκαν από το μύκητα (*Colletotrichum* sp.) που προκαλεί ανθράκνωση [<http://www.sorghumanthracnose.org/indexs.html>], η οποία όμως είχε σχετικά μικρή κλίμακα εμφάνισης έτσι ώστε δεν χρειάστηκε να παρθεί κανένα μέτρο για την αντιμετώπισή της (εικόνα 3.5.5). Η αυτοφυής βλάστηση δημιούργησε προβλήματα στις πρώτες φάσεις ανάπτυξης των φυτών σόργου αντιμετωπίστηκε δε με σκάλισμα και κοπή με χορτοκοπτικό.



Εικόνα 3.5.5 Συμπτώματα ανθράκνωσης στα φύλλα και στους βλαστούς του γλυκού σόργου που οφείλονται στα διάφορα είδη του γένους *Colletotrichum*. [<http://www.sorghumanthracnose.org/diseases.html>].

3.6 Η ΑΡΔΕΥΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ

Πριν από τη σπορά των φυτών και μετά τη διαδικασία οριοθέτησης των πειραματικών τεμαχίων και της χάραξης των γραμμών καλλιέργειας, τοποθετήθηκε κατά μήκος των γραμμών σύστημα στάγδην άρδευσης με σταλακτήρες ανά 0,25 m επί του αγωγού εφαρμογής και μέση παροχή σταλακτιήρων 0,3 lt/h (εικόνα 3.6.1). Καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου το σύστημα αυτό κάλυπτε τις ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό, βάση ενός ελεγχόμενου προγράμματος δυο επιπέδων άρδευσης (I_1 , I_2).



Εικόνα 3.6.1 Σύστημα στάγδην άρδευσης κατά μήκος του πειραματικού αγροτεμαχίου. (Από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών).

Συνολικά από την εγκατάσταση μέχρι και το τέλος της καλλιέργειας 30 Σεπτεμβρίου 2004 (ημερολογιακή ημέρα 274) έγιναν 20 διαδοχικές αρδεύσεις. Το εύρος άρδευσης ποικίλει ανάλογα με την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας. Ο χρονικός καθορισμός του προσδιορίζονταν με τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας (E.Y.), με ένα ζεύγος αισθητήρων (probe moisture meter, Delta-T Devices Ltd) (εικόνα 3.6.2) που είχαν τοποθετηθεί στα πειραματικά τεμάχια που λαμβάνονταν οι μετρήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Οι μετρήσεις ήταν καθημερινές και λαμβάνονταν κυρίως τις πρωινές ώρες της ημέρας αλλά και μετά από κάθε άρδευση.

Η άρδευση πραγματοποιούνταν όταν εξαντλούνταν το 75% της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας παίρνοντας ως επίπεδο αναφοράς τα 0,20 m από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό γινόταν κατά τις απογευματινές ώρες της ημέρας και για διάστημα τριών ωρών για το πρώτο επίπεδο άρδευσης, ενώ για το δεύτερο επίπεδο άρδευσης περιοριζόταν στη μια ώρα. Ο συνολικός όγκος του αρδευτικού νερού που καταναλώθηκε σε όλη την καλλιεργητική περίοδο ήταν $I_1 = 145$ mm για το πρώτο επίπεδο άρδευσης και $I_2 = 45$ mm για το δεύτερο επίπεδο άρδευσης. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι στο συνολικό όγκο του νερού που δέχτηκε η καλλιέργεια δεν συμπεριλαμβάνεται το ύψος της βροχόπτωσης.



Εικόνα 3.6.2 Αισθητήρας για τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας (probe moisture meter, Delta-T Devices Ltd). (Από το αρχείο του εργαστηρίου της Φυσιολογίας των φυτικών καλλιεργειών του Πανεπιστημίου Πατρών).

3.7 Η ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΘΡΕΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Για την κάλυψη των αναγκών της καλλιέργειας σε θρεπτικά στοιχεία σε κάθε πειραματικό τεμάχιο με συμβατική διαχείριση προστέθηκαν 4,9 Kg συνθετικού λιπάσματος με την εμπορική ονομασία Complet 12-12-17+2MgO. Η σύνθεση του λιπάσματος είναι 12% N υπό μορφή νιτρικού 6% και αμμωνιακού 6% (Κιτρικό αμμώνιο 85%), 12% P₂O₅ και 17% K υπό μορφή θειικού καλίου.

Για την κάλυψη των αναγκών σε κάλιο σε κάθε πειραματικό τεμάχιο βιολογικής διαχείρισης προστέθηκαν 1,73 Kg 0-0-48 (πάτεντ κάλι), έτσι ώστε να έχει

προσθεθεί σε όλα τα πειραματικά τεμάχια ισόποση ποσότητα καλίου. Επιπλέον έγινε εμπλουτισμός του εδάφους με οργανική ουσία. Προς τούτο προστέθηκαν 300 lt τύρφης τύπου Βαλτικής με βάση το *sphagnum* (οργανική ουσία 91%, pH = 5,5) ίδιου τύπου με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στη σπορά.

3.8 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανική ουσία είναι βασικής σημασίας, γιατί η οργανική ουσία είναι πηγή θρεπτικών στοιχείων (άζωτο, φώσφορος, κάλιο) τα οποία είναι απαραίτητα για την κανονική ανάπτυξη του φυτού. Εκτός αυτού η οργανική ουσία του εδάφους συμβάλλει στη βελτίωση πολλών ιδιοτήτων του εδάφους, όπως η συγκράτηση του νερού στο έδαφος αλλά και στη δημιουργία και διατήρηση της καλής δομής στο έδαφος. Επειδή λοιπόν η σημασία της οργανικής ουσίας του εδάφους είναι μεγάλη, ο προσδιορισμός της είναι απαραίτητος και κατέχει σημαντική θέση στη σειρά των χημικών αναλύσεων του εδάφους.

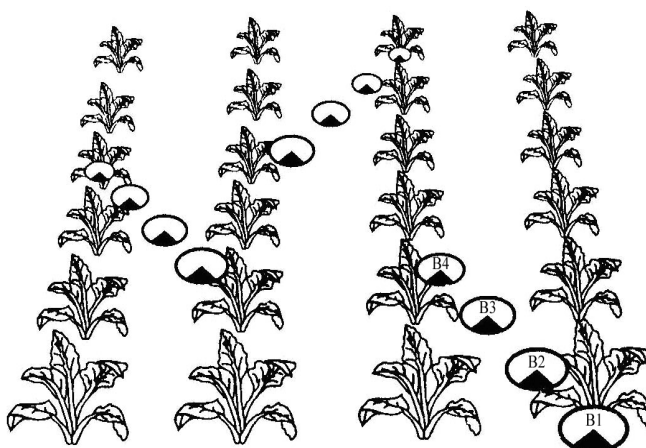
Για τον προσδιορισμό της οργανικής ουσίας στο έδαφος χρησιμοποιήθηκε η έμμεση μέθοδος της αποτέφρωσης (loss on ignition-L.O.I.) που συνίσταται στην απώλεια βάρους δείγματος εδάφους λόγω καύσης της οργανικής ουσίας (Αλιφραγκής & Παπαμίχος, 1995). Η διαδικασία προσδιορισμού έχει ως εξής: Σε χωνευτήρια από πορσελάνη γνωστού βάρους φέρονται 20 gr εδαφικού δείγματος. Τα χωνευτήρια με το έδαφος τοποθετούνται για 24 ώρες σε φούρνο θερμοκρασίας 105°C. Αφού ψυχθούν τα δείγματα ξαναζυγίζονται για να βρεθεί το βάρος του ξηρού εδαφικού δείγματος. Ακολούθως τα χωνευτήρια τοποθετούνται σε φούρνο υψηλής θερμοκρασίας, όπου παραμένουν στους 350°C για 48 ώρες. Μετά την ψύξη τους (σε ξηραντήριο) ξαναζυγίζονται. Η διαφορά βάρους του ξηρού εδάφους προ και μετά την καύση αποδίδεται στην καταστροφή της οργανικής ουσίας. Έτσι εάν B_1 είναι το ξηρό βάρος (105°C) του εδαφικού δείγματος πριν την αποτέφρωση και B_2 είναι το βάρος του ίδιου δείγματος μετά την αποτέφρωση, τότε η απώλεια βάρους λόγω αποτέφρωσης (loss on ignition-L.O.I.) δίνεται από τη σχέση:

$$\text{L.O.I}\% = \frac{B_1 - B_2}{B_1} \cdot 100 \quad (3.8)$$

3.9 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ LAI ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ ΣΤΗΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΓΛΥΚΟΥ ΣΟΡΓΟΥ

Για την παρακολούθηση της εξέλιξης του δείκτη της φυλλικής επιφάνειας (LAI) με το χρόνο στην καλλιέργεια του γλυκού σόργου, επιλέχθηκαν τέσσερα πειραματικά τεμάχια T₂, T₃ και T₇, T₈ τα οποία συνδύαζαν τόσο τα δυο επίπεδα άρδευσης (I₁, I₂) που εφαρμόστηκαν όσο και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες καλλιεργήθηκαν τα φυτά (συμβατική και βιολογική διαχείριση της καλλιέργειας) (εικόνα 3.1). Σε καθένα από αυτά επιλέχθηκαν τρεις θέσεις με αντιπροσωπευτικά φυτά. Οι μετρήσεις ξεκίνησαν στις 18 Ιουνίου (ημερολογιακή ημέρα 170) και πραγματοποιούνταν ανά επτά ημέρες στις ίδιες θέσεις, ακολουθώντας το παρακάτω πρωτόκολλο μετρήσεων.

Ο αναλυτής LAI-2000 (Licor, inc. USA) ρυθμίστηκε να υπολογίζει το LAI στο κάθε πειραματικό τεμάχιο πραγματοποιώντας μια Α μέτρηση στο επάνω μέρος της φυτικής κόμης και τέσσερις διαδοχικές Β μετρήσεις στο κάτω μέρος της. Επίσης ρυθμίστηκε να δίνει τη σταθμισμένη τιμή του LAI μετά από τρεις επαναλήψεις στο κάθε πειραματικό τεμάχιο. Οι Β μετρήσεις (B1, B2, B3, B4) πραγματοποιούνταν κατά μήκος μιας διαγωνίου (γωνίας 45°) και σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις. Η Β1 μέτρηση λαμβάνονταν ακριβώς κάτω από τη φυτική κόμη ενός φυτού και οι υπόλοιπες ανά 0,25 m κατά μήκος της διαγωνίου, πάντοτε μεταξύ δυο εσωτερικών γραμμών της καλλιέργειας (εικόνα 3.9). Όλες οι Β μετρήσεις γίνονταν στο ίδιο επίπεδο. Από την αρχή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ο οπτικός παρεμποδιστής των 45°. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν νωρίς το πρωί.



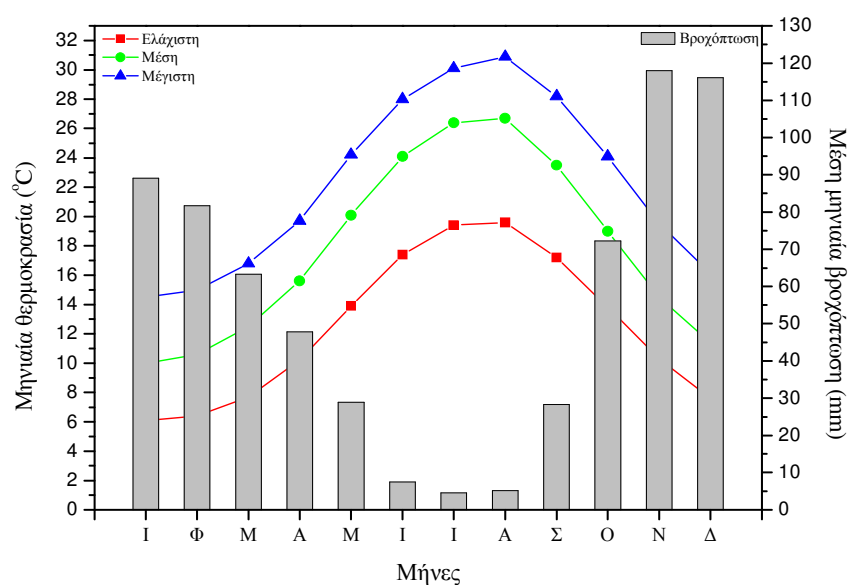
Εικόνα 3.9 Παράδειγμα της πραγματοποίησης των Β μετρήσεων στην καλλιέργεια του γλυκού σόργου. [2].

4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΓΡΟΚΤΗΜΑΤΟΣ

Με βάση τα δεδομένα της Ε.Μ.Υ. (ως μέσοι όροι της τελευταίας πενταετίας για την περιοχή της Πάτρας) συνάγεται ότι το κλίμα της περιοχής μπορεί να χαρακτηριστεί ως μεσογειακό με έντονες τις επιδράσεις του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η επίδραση του κλίματος στη διαμόρφωση της βλάστησης σε ένα οικοσύστημα είναι καθοριστική και τις περισσότερες φορές η βλάστηση μίας περιοχής αποτελεί έκφραση του κλίματός της. Την περίοδο της καλλιέργειας (Μάιος - Οκτώβριος) προβλέπεται μια συνεχή μείωση της βροχόπτωσης και παράλληλα σταδιακή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες (διάγραμμα 4.1).



Διάγραμμα 4.1 Ομβροθερμικό διάγραμμα περιοχής Πατρών (Μεταβολές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης, δεδομένα τελευταίας πενταετίας, Ε.Μ.Υ.).

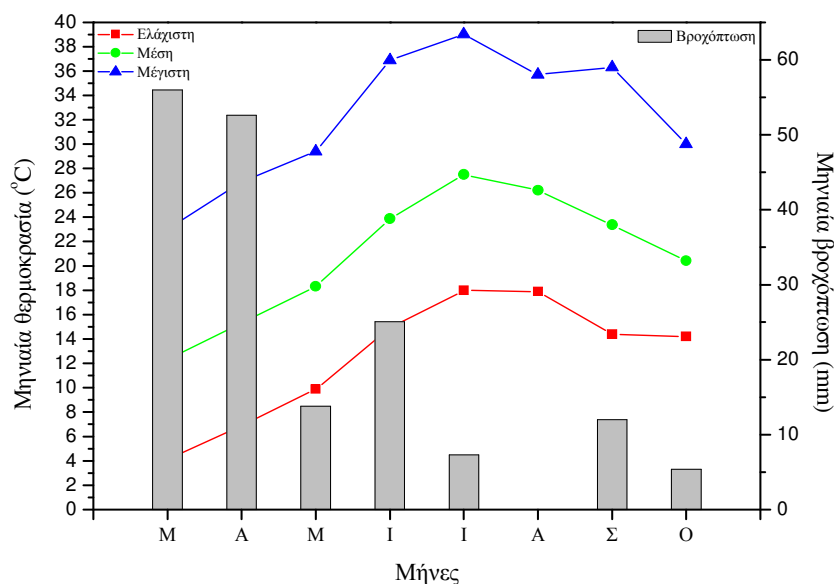
Με βάση τις ανωτέρω κλιματικές τιμές της περιοχής της Πάτρας, την περίοδο της φύτευσης (8 Ιουνίου, ημερολογιακή ημέρα 160), η μέση ελάχιστη μηνιαία θερμοκρασία κυμαίνεται στους 17,4°C, ενώ η μέση μέγιστη στους 28°C. Όλους τους μήνες του θέρους προβλέπονται έστω και μικρού ύψους βροχοπτώσεις. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας παίζουν σημαντικό ρόλο σε όλα τα στάδια ανάπτυξης των φυτών του γλυκού σόργου όπως η βλάστηση των σπερμάτων, η εμφάνιση νέων φύλλων και η αύξησή τους. Θερμοκρασίες εδάφους που ξεπερνούν τους 15°C θεωρούνται

βέλτιστες για τη βλάστηση των σπερμάτων, ενώ για το ρυθμό εμφάνισης νέων φύλλων οριακή θερμοκρασία λαμβάνεται 9,3°C. Γενικά μια μέση θερμοκρασία 17°C αποτελεί οριακό παράγοντα για την ανάπτυξη των φυτών του γλυκού σόργου (Soontornchainaksaeng *et al.*, 1996).

4.2 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΑΓΡΟΚΤΗΜΑΤΟΣ

Τα μετεωρολογικά δεδομένα ελήφθησαν από το μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Πατρών που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 300 μέτρων από τον πειραματικό αγρό. Από την επεξεργασία των δεδομένων στο πρόγραμμα Origin v.6.1 (OriginLab Corporation) προεκύψαν μια σειρά από διαγράμματα από τα οποία είχαμε μια σαφέστερη εικόνα για τις καιρικές συνθήκες που επικράτησαν κατά την περίοδο ανάπτυξης της καλλιέργειας του γλυκού σόργου.

Στο διάγραμμα 4.2.1 φαίνονται οι αντίστοιχες μεταβολές της μηνιαίας θερμοκρασίας του αέρα (μέγιστη, ελάχιστη και μέση, σε °C) και της μηνιαίας βροχόπτωσης (σε mm) πλησίον του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Πατρών που έγιναν τα πειράματα κατά την καλλιεργητική περίοδο 2004.

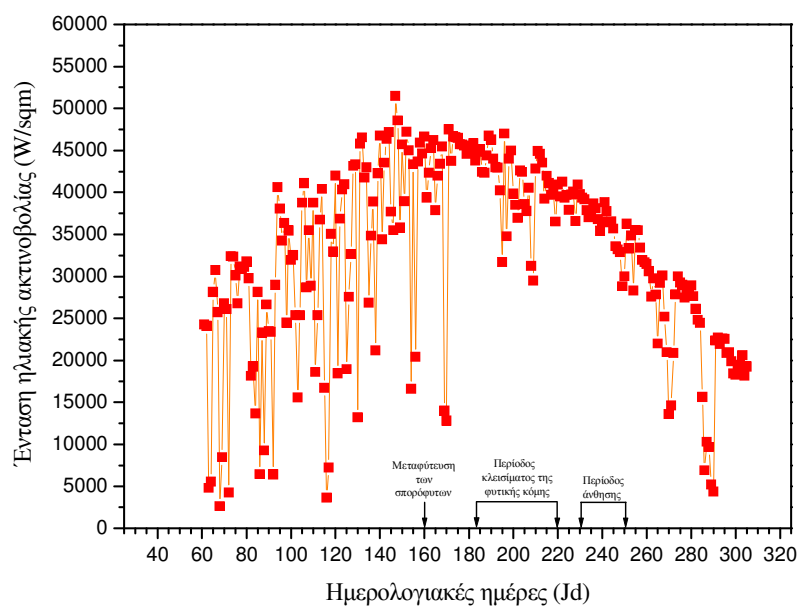


Διάγραμμα 4.2.1 Ομβροθερμικό διάγραμμα περιοχής Πανεπιστημίου Πατρών για το καλλιεργητικό έτος 2004 (Μεταβολές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης, δεδομένα από μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Πατρών).

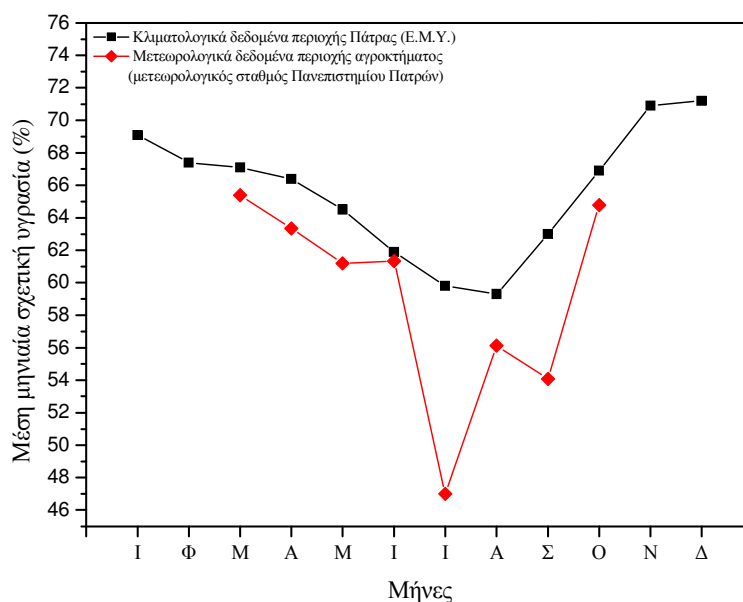
Σε σχέση με τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής Πατρών, και την ανάλυση των μετεωρολογικών δεδομένων του Πανεπιστημίου Πατρών διαπιστώθηκαν διαφοροποιήσεις όσον αφορά τις μέσες μηνιαίες μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες. Πιο συγκεκριμένα η μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία παρατηρήθηκε το μήνα Ιούλιο (39°C), ενώ με βάση τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, για τον αντίστοιχο μήνα, δεν προβλέπονται θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 30,1°C. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου παρατηρήθηκαν πολύ μεγαλύτερες μέγιστες θερμοκρασίες από τις μέσες κλιματολογικές τιμές της περιοχής, με διακύμανση από 4,8 έως 8,9°C. Λιγότερο σημαντικές μεταβολές παρατηρήθηκαν στη μέση ελάχιστη θερμοκρασία, η οποία δεν ξεπέρασε τις μέσες κλιματικές τιμές καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Σημαντικές διακυμάνσεις καταγράφηκαν ως προς τη βροχόπτωση με πρακτικά μηδενική τιμή το μήνα Αύγουστο 2004, ενώ σημαντικές βροχοπτώσεις σημειώθηκαν τους μήνες Απρίλιο, Ιούνιο και Ιούλιο οι οποίες ξεπέρασαν τις μέσες κλιματικές τιμές της περιοχής. Σημαντικότερη αυτών ήταν για το μήνα Ιούνιο (25,1 mm) κατά την περίοδο της φύτευσης των σπορόφυτων (8 Ιουνίου, ημερολογιακή ημέρα 160). Αρκετά ξηροί ήταν οι μήνες Μάιος και Σεπτέμβριος, ενώ περισσότερο ξηρός ήταν ο Οκτώβριος με 5,4 mm αντί 72,2 mm βροχής που προβλέπουν τα κλιματολογικά δεδομένα.

Στα διαγράμματα 4.2.2 και 4.2.3 φαίνονται οι ημερήσιες μεταβολές της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχτηκε η καλλιέργεια του γλυκού σόργου και οι μεταβολές της μέσης μηνιαίας σχετικής υγρασίας, αντιστοίχως. Από το διάγραμμα 4.2.2 φαίνεται ότι κατά την καλλιεργητική περίοδο του έτους 2004 είχαμε υψηλές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας, με τις υψηλότερες τιμές να σημειώνονται κατά την περίοδο που παρατηρήθηκε το κλείσιμο της φυτικής κόμης της καλλιέργειας του γλυκού σόργου, γεγονός που ευνοεί τις αποδόσεις του γλυκού σόργου σε βιομάζα. Οι εντάσεις της ηλιακής ακτινοβολίας που καταγράφονται αθροιστικά όλη την καλλιεργητική περίοδο έχουν μεγάλη σημασία δεδομένου ότι σύμφωνα με το μοντέλο Monteith η βιομάζα που παράγεται είναι ανάλογη της αθροιζόμενης προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Lemaire & Chartier, 1996).



Διάγραμμα 4.2.2 Μεταβολές της ολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή του αγροκτήματος Πανεπιστημίου Πατρών για το καλλιεργητικό έτος 2004. (Δεδομένα από μετεωρολογικό σταθμό του Πανεπιστημίου Πατρών).



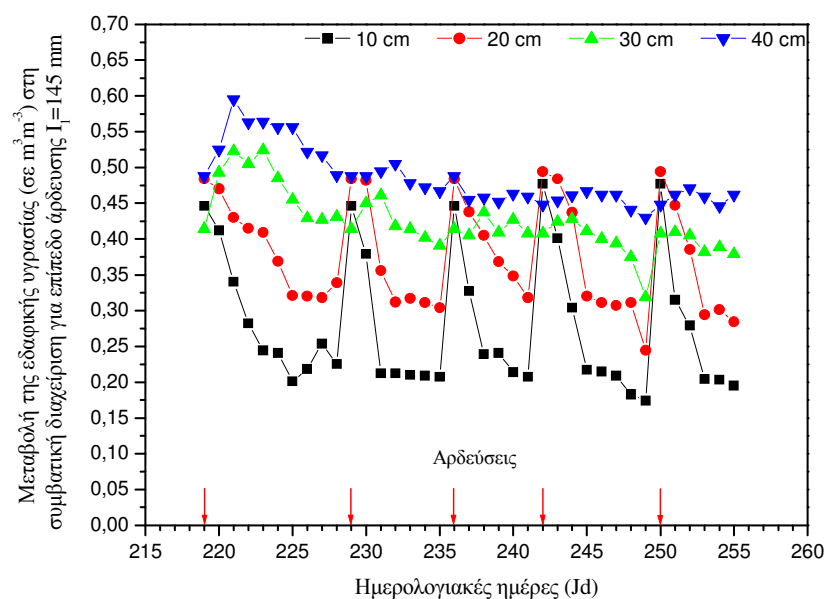
Διάγραμμα 4.2.3 Σύγκριση της μέσης μηνιαίας σχετικής υγρασίας βάσει των δεδομένων της Ε.Μ.Υ. και των μετεωρολογικών δεδομένων (μετεωρολογικός σταθμός Πανεπιστημίου Πατρών) για την περιοχή του αγροκτήματος Πανεπιστημίου Πατρών.

Η μηνιαία πορεία της σχετικής υγρασίας επηρεάζεται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα. Οι χαμηλές τιμές της σχετικής υγρασίας (47%) κατά το μήνα Ιούλιο σχετίζονται με τις υψηλές θερμοκρασίες του αέρα (39°C) που καταγράφηκαν κατά το μήνα αυτό (διάγραμμα 4.2.3). Με βάση τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής η τιμή της σχετικής υγρασίας, για τον αντίστοιχο μήνα, προβλεπόταν υψηλότερη (59,8%) εξαιτίας της διαφοράς στη διακύμανση της θερμοκρασίας που ήταν κατά 8,9°C χαμηλότερη για τον ίδιο μήνα.

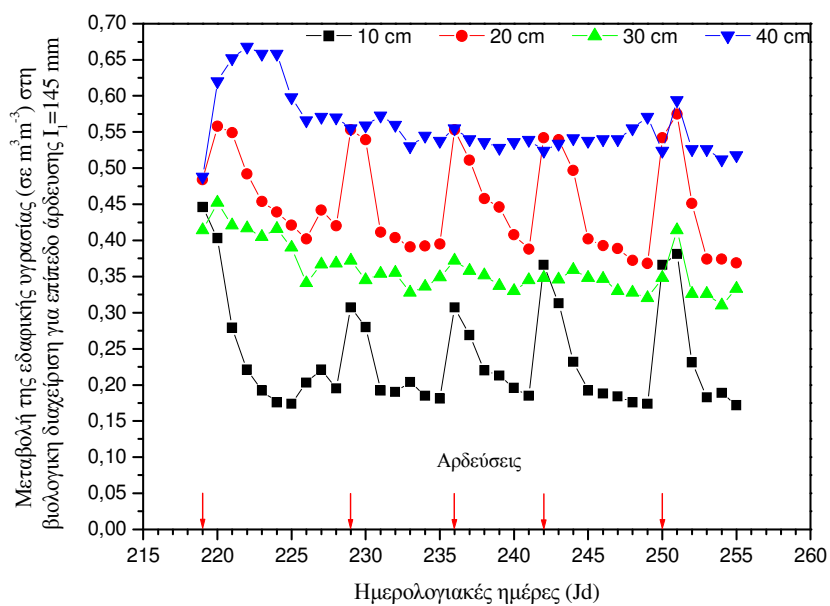
4.3 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η εδαφική υγρασία μετρήθηκε με αισθητήρες που είχαν τοποθετηθεί στα πειραματικά τεμάχια που λάμβανε χώρα η μέτρηση του LAI. Η άρδευση πραγματοποιούνταν όταν εξαντλούνταν το 75% της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας παίρνοντας ως επίπεδο αναφοράς τα 0,20 m από την επιφάνεια του εδάφους. Από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψαν σημαντικά στοιχεία τα οποία παρατήθονται στη συνέχεια.

Στα διαγράμματα 4.3.1 και 4.3.2 φαίνονται αντίστοιχα οι μεταβολές της εδαφικής υγρασίας στα πειραματικά τεμάχια με τη συμβατική και βιολογική διαχείριση για επίπεδο άρδευσης $I_1 = 145$ mm. Με την προσθήκη του αρδευτικού νερού αυξάνει η εδαφική υγρασία στα διαφορετικά βάθη του εδάφους, όπου έχουμε τον κύριο όγκο του ριζικού συστήματος, ανάλογα με τη δομή του εδαφικού συστήματος, τις απώλειες και μετακινήσεις του νερού από την επιφάνεια του εδάφους προς βαθύτερα στρώματα.



Διάγραμμα 4.3.1



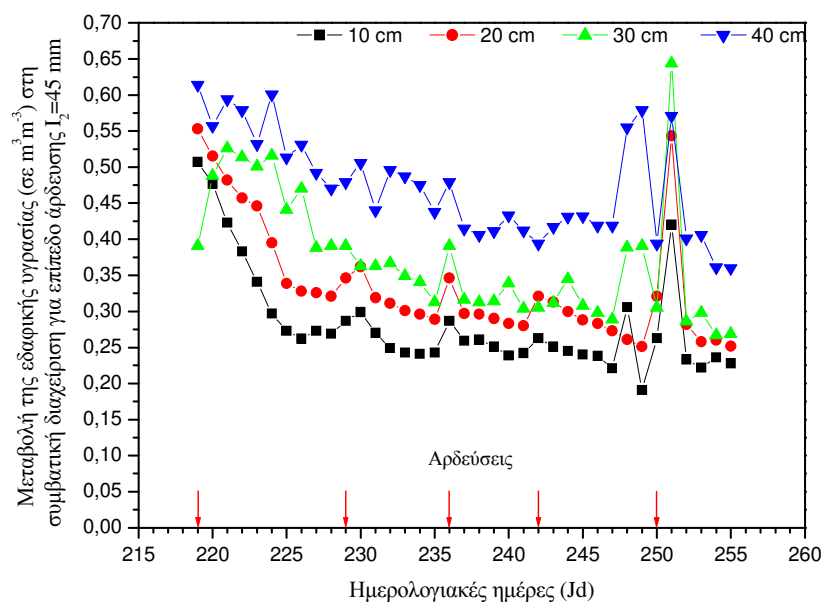
Διάγραμμα 4.3.2

Διάγραμμα 4.3.1 και **4.3.2** Μεταβολές της εδαφικής υγρασίας στα πειραματικά τεμάχια συμβατικής και βιολογικής διαχείρισης της καλλιέργειας για επίπεδο άρδευση $I_1 = 145 \text{ mm}$.

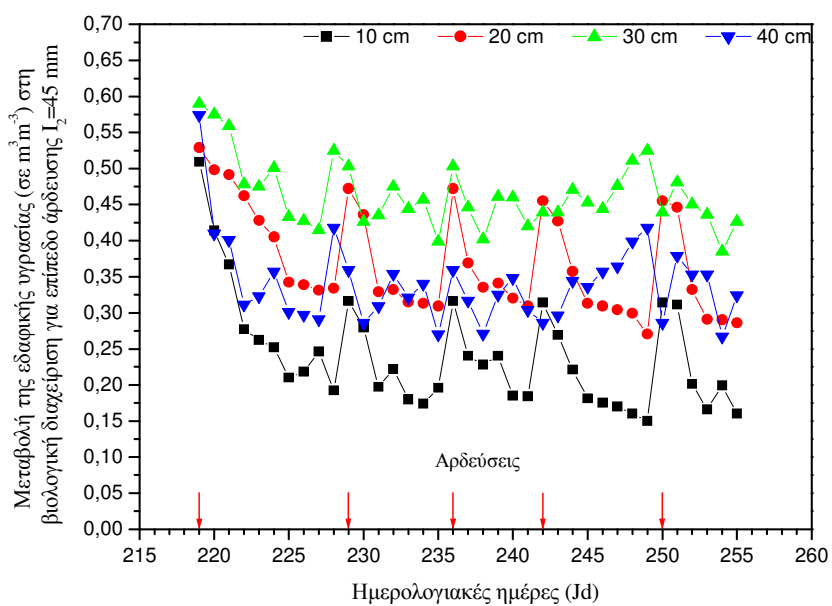
Η μείωση της εδαφικής υγρασίας στο στρώμα 0-10 cm οφείλεται κυρίως στην εξάτμιση του νερού και στις μετακινήσεις του νερού προς βαθύτερα στρώματα λόγω βαρύτητας. Στην περιοχή σε βάθος από 10-40 cm οι μεταβολές της εδαφικής υγρασίας οφείλονται κυρίως στις μετακινήσεις του νερού λόγω βαρύτητας και στην απορρόφηση από το ριζικό σύστημα λόγω του φαινομένου της εξάτμισοδιαπνοής.

Στα διαγράμματα 4.3.1 και 4.3.2 στην περιοχή 0-10 cm έχουμε τα ίδια επίπεδα ελάχιστης υγρασίας. Για την περιοχή 10-30 cm για την μεν συμβατική διαχείριση έχουμε ανάλογες μεταβολές όπως και στη περιοχή 0-10 cm, ενώ στη βιολογική διαχείριση είχαμε μια μετακίνηση του νερού με συνέπεια η εδαφική υγρασία να διατηρείται σε υψηλά επίπεδα και να συγκρατείται ως ένα βαθμό λόγω του υψηλότερου ποσοστού οργανικής ουσίας στην περιοχή 0-30 cm και τελικά να καταλήγει σε βαθύτερα στρώματα 0-40 cm.

Στα διαγράμματα 4.3.3 και 4.3.4 φαίνονται αντίστοιχα οι μεταβολές της εδαφικής υγρασίας στα πειραματικά τεμάχια με τη συμβατική και βιολογική διαχείριση για επίπεδο άρδευσης $I_2 = 45 \text{ mm}$. Με την προσθήκη του αρδευτικού νερού η εδαφική υγρασία μειώνεται με γρήγορους ρυθμούς στο στρώμα εδάφους από 0-30 cm παραμένοντας σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό συνάγεται ότι στο στρώμα εδάφους από 0-30 cm έχουμε μετακινήσεις του νερού προς βαθύτερα στρώματα λόγω βαρύτητας. Αντιθέτως στα πειραματικά τεμάχια με την βιολογική διαχείριση το νερό συγκρατείται στην περιοχή γύρω από 20-30 cm που βρίσκεται και ο κύριος όγκος της ριζόσφαιρας εξαιτίας των μικρών ποσοτήτων οργανικής ουσίας.



Διάγραμμα 4.3.3



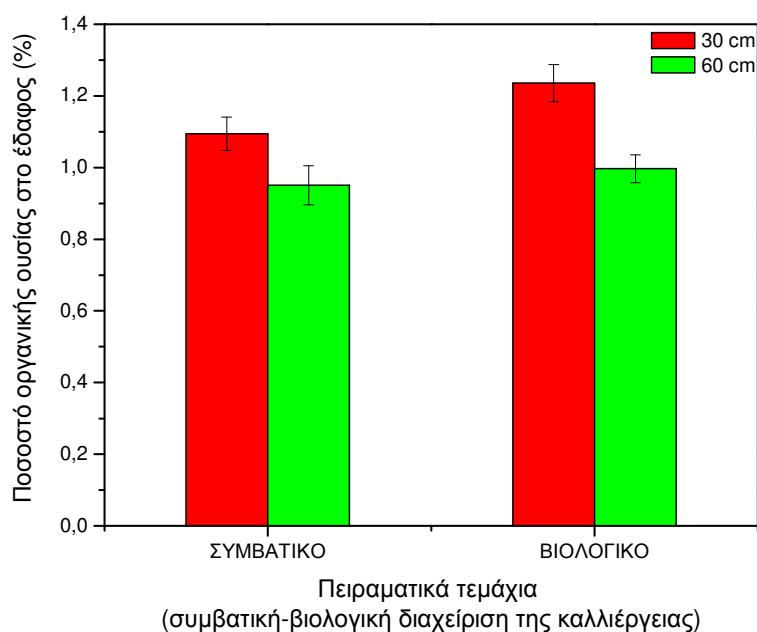
Διάγραμμα 4.3.4

Διάγραμμα 4.3.3 και **4.3.4** Μεταβολές της εδαφικής υγρασίας στα πειραματικά τεμάχια συμβατικής και βιολογικής διαχείρισης της καλλιέργειας για επίπεδο άρδευσης $I_2 = 45$ mm.

Γενικά η γνώση της περιεχόμενης στο έδαφος υγρασίας αποτελεί έναν από τους πιο βασικούς παράγοντες για τον καθορισμό της σχέσης εδάφους νερού και φυτού. Το νερό είναι ένα τα σπουδαιότερα συστατικά του εδάφους και επηρεάζει τόσο την χημική, όσο και τη φυσική συμπεριφορά του. Έχει μεγάλη σημασία για τη θρέψη των φυτών γιατί αποτελεί βασικό συστατικό των ιστών τους και είναι απαραίτητο για τις φυσιολογικές λειτουργίες τους.

4.4 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΟΡΓΑΝΙΚΗΣ ΟΥΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Όπως αναφέρθηκε η οργανική ουσία στο έδαφος προσδιορίστηκε με την έμμεση μέθοδο της αποτέφρωσης (loss on ignition-L.O.I.). Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου έχουν αποτυπωθεί στο διάγραμμα 4.4 στο οποίο γίνεται σύγκριση του ποσοστού της οργανικής ουσίας στο έδαφος για δυο διαφορετικά βάθη λήψης εδαφικού δείγματος και για τους δυο τρόπους διαχείρισης της καλλιέργειας.



Διάγραμμα 4.4 Η περιεκτικότητα του εδάφους σε οργανική ουσία, για τους δυο χειρισμούς που εφαρμόστηκαν (συμβατική-βιολογική διαχείριση της καλλιέργειας) και για βάθος 0-30 cm και 0-60 cm αντίστοιχα.

Η προσθήκη οργανικής ουσίας (300 lt τύρφης τύπου Βαλτικής με βάση το *sphagnum*) στα πειραματικά τεμάχια με το βιολογικό τρόπο διαχείρισης είχε ως αποτέλεσμα το ποσοστό της περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανική ουσία να είναι υψηλότερο από εκείνο στο συμβατικό τρόπο διαχείρισης της καλλιέργειας τόσο για τα δυο επίπεδα άρδευσης που εφαρμόστηκαν (I_1 , I_2) όσο και για τα δύο βάθη που έγινε η δειγματοληψία του εδάφους. Όσο αναφορά το βάθος των 30 cm το ποσοστό οργανικής ουσίας βρέθηκε κατά 12% αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό στο συμβατικό τρόπο διαχείρισης της καλλιέργειας, ενώ για το βάθος των 60 cm η αύξηση ήταν κατά πολύ μικρότερη και δεν ξεπέρασε το 4%.

4.5 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΦΥΛΛΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ (LAI)

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) προσδιορίστηκε με την έμμεση μέθοδο μέτρησης που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό του LAI με το χρόνο πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερα πειραματικά τεμάχια (T_2 , T_3 και T_7 , T_8) που συνδυάζουν τόσο τα δυο επίπεδα άρδευσης (I_1 , I_2) που εφαρμόστηκαν όσο και τους τρόπους που καλλιεργήθηκαν τα φυτά (συμβατική – βιολογική καλλιέργεια).

Οι μεταβολές του LAI με το χρόνο περιγράφονται από καμπύλες τύπου Gauss ανεξαρτήτως χειρισμών. Στις μετρούμενες τιμές του LAI έχει γίνει μη γραμμική συσχέτιση των μεταβολών του LAI με το χρόνο. Ο τύπος της προσαρμογής που επιλέχτηκε είναι η συνάρτηση Gauss, που έχει την ακόλουθη εξίσωση:

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi}/2} e^{-\frac{2(x-x_c)^2}{w^2}}$$

Οι σταθερές της εξίσωσης προσαρμογής y_0 , x_c , w , A παρατίθενται στα ειδικά πλαίσια πληροφοριών των διαγραμμάτων.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) και το τυπικό σφάλμα (SEL) στις αντίστοιχες ημερολογιακές ημέρες (Jd) των μετρήσεων, για όλους τους χειρισμούς που εφαρμόστηκαν.

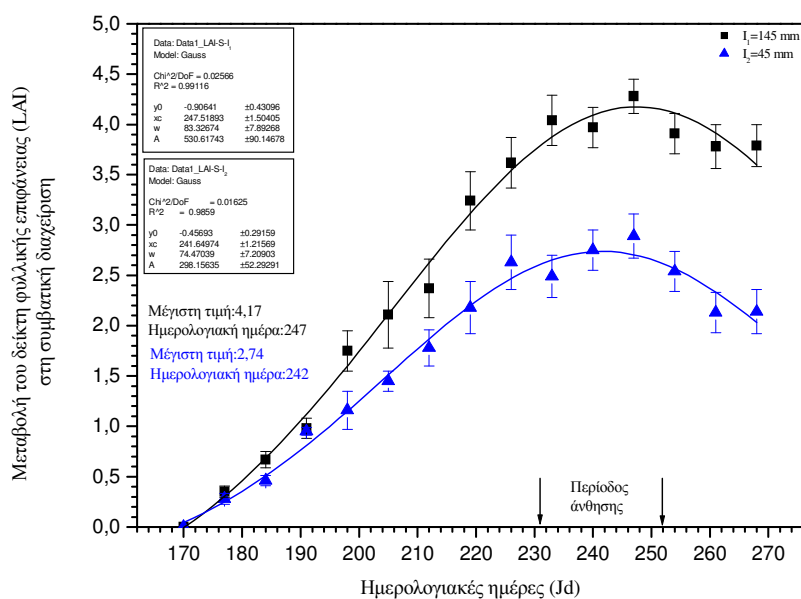
Πίνακας 4.5 Οι τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI), που μετρήθηκαν στην καλλιέργεια του γλυκού σόργου με τη βοήθεια του αναλυτή φυτικής κόμης LAI-2000 (Licor, inc. USA).

| Δείκτης φυλλικής επιφάνειας – LAI | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------|-------------------------------|------|-------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| Ημερολογιακές ημέρες (Jd) | Πρόγραμμα άρδευσης | | | | | | | |
| | I ₁ = 145 mm | | | | I ₂ = 45 mm | | | |
| | Πειραματικά τεμάχια | | | | | | | |
| | T ₂ (συμβατικό) | | T ₃ (βιολογικό) | | T ₇ (συμβατικό) | | T ₈ (βιολογικό) | |
| | LAI | SEL | LAI | SEL | LAI | SEL | LAI | SEL |
| 170 | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| 177 | 0,35 | 0,055 | 0,32 | 0,04 | 0,33 | 0,053 | 0,35 | 0,055 |
| 184 | 0,67 | 0,08 | 0,47 | 0,1 | 0,56 | 0,05 | 0,58 | 0,04 |
| 191 | 0,98 | 0,1 | 0,86 | 0,13 | 0,76 | 0,04 | 0,87 | 0,026 |
| 198 | 1,75 | 0,2 | 1,67 | 0,15 | 1,5 | 0,19 | 1,53 | 0,14 |
| 205 | 2,11 | 0,33 | 1,94 | 0,33 | 1,76 | 0,1 | 1,78 | 0,05 |
| 212 | 2,37 | 0,29 | 2,62 | 0,32 | 2,1 | 0,18 | 2,18 | 0,18 |
| 219 | 3,24 | 0,29 | 3,38 | 0,32 | 2,18 | 0,26 | 2,38 | 0,33 |
| 226 | 3,62 | 0,25 | 3,72 | 0,23 | 2,63 | 0,27 | 3,22 | 0,32 |
| 233 | 4,04 | 0,25 | 3,83 | 0,22 | 2,49 | 0,21 | 3 | 0,23 |
| 240 | 3,97 | 0,2 | 4,11 | 0,24 | 2,75 | 0,2 | 3,34 | 0,21 |
| 247 | 4,28 | 0,17 | 4,61 | 0,2 | 2,89 | 0,22 | 3,83 | 0,19 |
| 254 | 3,91 | 0,2 | 3,96 | 0,13 | 2,54 | 0,2 | 3,89 | 0,19 |
| 261 | 3,78 | 0,22 | 3,8 | 0,14 | 2,13 | 0,2 | 3,58 | 0,23 |
| 268 | 3,79 | 0,21 | 3,59 | 0,19 | 2,14 | 0,22 | 3,69 | 0,21 |

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα που προκύπτουν ύστερα από την επεξεργασία των δεδομένων του Πίνακα 4.5 στο πρόγραμμα Origin v.6.1 (OriginLab Corporation), ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας αυξάνεται εκθετικά κατά την περίοδο της έντονης αύξησης των φυτών της καλλιέργειας. Στην συνέχεια λαμβάνει μια μέγιστη τιμή, που χρονικά συμπίπτει με την περίοδο της ολοκλήρωσης της άνθησης των φυτών και στη συνέχεια υφίσταται μείωση μέχρι το τέλος της καλλιέργειας, που οφείλεται στη γήρανση και σταδιακή πτώση των μεγαλύτερης σε ηλικία φύλλων. Οι παρακάτω μεταβολές συμφωνούν με τα όσα αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Kvet *et al.*, 1971, Watson, 1958).

Στα διαγράμματα 4.5.1 και 4.5.2 παρουσιάζεται η εξέλιξη του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με το χρόνο, με βάση τον τρόπο με τον οποίον καλλιεργήθηκαν

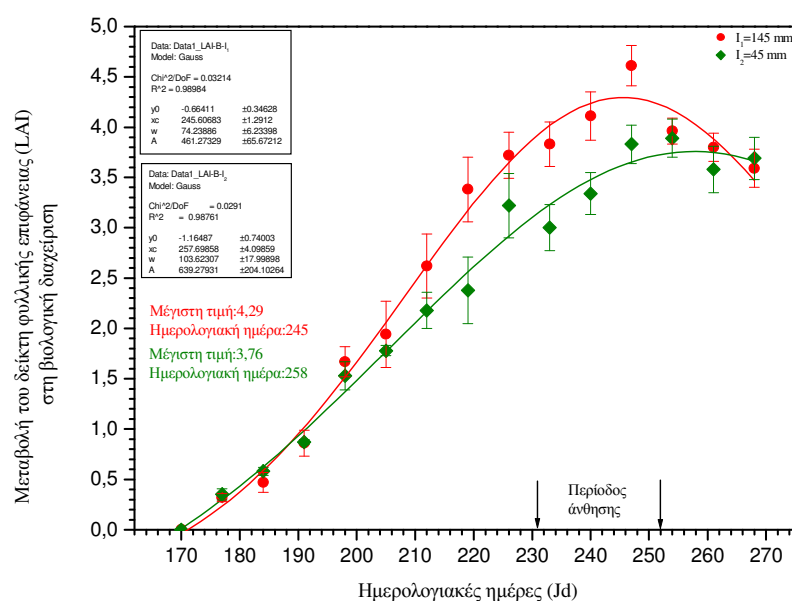
τα φυτά του γλυκού σόργου (συμβατική – βιολογική καλλιέργεια). Και στους δυο τρόπους καλλιέργειας διαπιστώθηκαν διαφορές κυρίως τόσο ως προς τις μέγιστες τιμές του LAI όσο και ως προς το χρόνο που εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές. Πιο συγκεκριμένα στο συμβατικό τρόπο καλλιέργειας και ύστερα από την εφαρμογή του επιπέδου άρδευσης $I_1 = 145$ mm, ο LAI έφθασε στη μέγιστη τιμή 4,17 (την Jd =247) μετά από 77 ημερολογιακές ημέρες, ενώ με την εφαρμογή του επιπέδου άρδευσης $I_2 = 45$ mm η αντίστοιχη τιμή του έφθασε τα 2,74 (την Jd = 242) μετά από 72 ημερολογιακές ημέρες από την έναρξη του πειράματος (διάγραμμα 4.5.1). Οπότε ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας στο συμβατικό τρόπο διαχείρισης και για επίπεδο άρδευσης I_1 ήταν κατά 52,19% μεγαλύτερος συγκριτικά με το επίπεδο άρδευσης I_2 με διαφορά 5 ημερολογιακών ημερών για την αποκτηση της μέγιστης τιμής του από την την έναρξη της καλλιέργειας.



Διάγραμμα 4.5.1 Η επίδραση των δυο επιπέδων άρδευσης ($I_1 = 145$ mm, $I_2 = 45$ mm), στην μεταβολή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) με το χρόνο (ημερολογιακές ημέρες), σε συμβατική καλλιέργεια γλυκού σόργου, όπως προσδιορίστηκε με την έμμεση τεχνική.

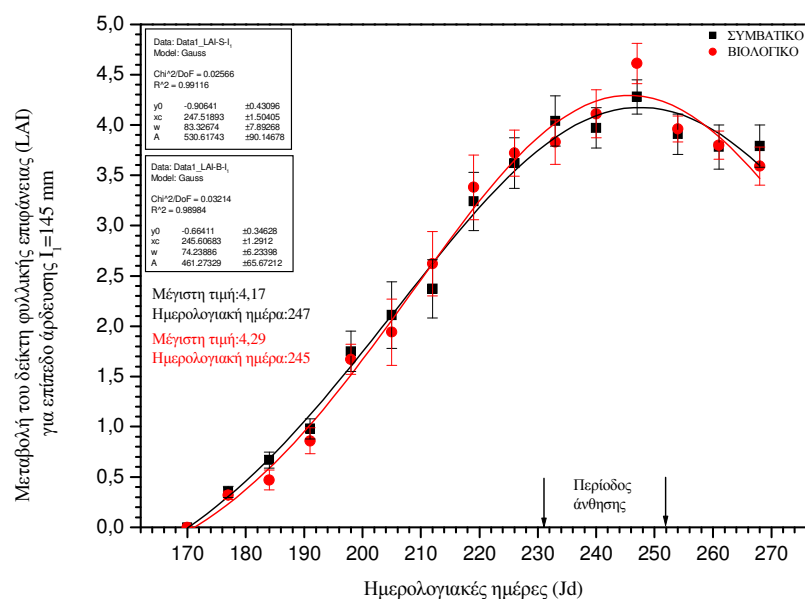
Αντιθέτως, στο βιολογικό τρόπο καλλιέργειας οι μέγιστες τιμές του LAI ήταν κατά πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στη συμβατική καλλιέργεια και για τα δυο επίπεδα άρδευσης που εφαρμόστηκαν (διάγραμμα 4.5.2). Στο πρώτο επίπεδο

άρδευσης (I_1) ο LAI έφθασε στη μέγιστη τιμή 4,29 (την Jd = 245) μετά από 75 ημερολογιακές ημέρες, ενώ για το δεύτερο επίπεδο άρδευσης (I_2) η αντίστοιχη τιμή του έφθασε τα 3,76 (την Jd = 258) μετά από 88 ημερολογιακές ημέρες από την έναρξη του πειράματος. Οπότε ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας στο βιολογικό τρόπο διαχείρισης και για επίπεδο άρδευσης I_1 ήταν κατά 14% μεγαλύτερος συγκριτικά με το επίπεδο άρδευσης I_2 με διαφορά 13 ημερολογιακών ημερών για την απόκτηση της μέγιστης τιμής του από την έναρξη της καλλιέργειας.



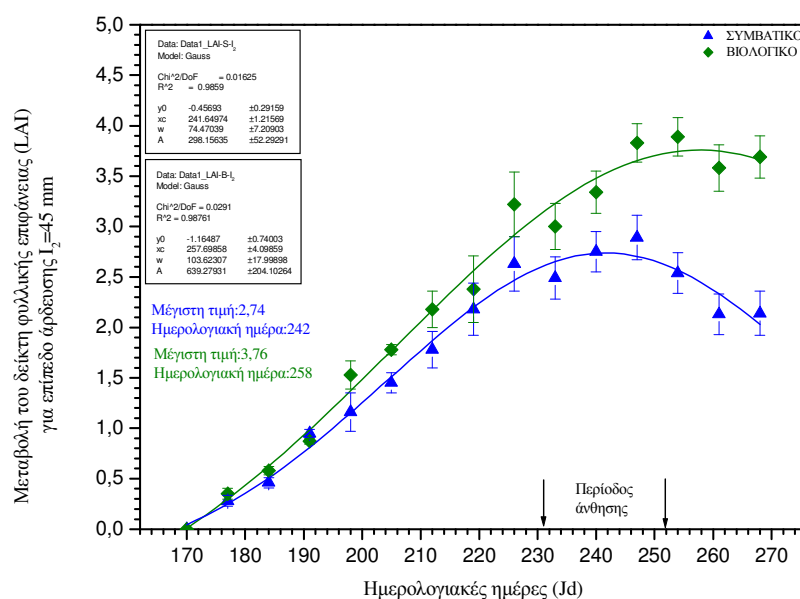
Διάγραμμα 4.5.2 Η επίδραση των δυο επιπέδων άρδευσης ($I_1 = 145$ mm, $I_2 = 45$ mm), στην μεταβολή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) με το χρόνο (ημερολογιακές ημέρες), σε βιολογική καλλιέργεια γλυκού σόργου, όπως προσδιορίστηκε με την έμμεση τεχνική.

Στα διαγράμματα 4.5.3 και 4.5.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με το χρόνο, σε συμβατική και βιολογική καλλιέργεια γλυκού σόργου, κάτω από την επίδραση δυο διαφορετικών επιπέδων άρδευσης. Όσον αναφορά το επίπεδο άρδευσης $I_1 = 145$ mm, τόσο στις μεταβολές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας κατά τη διάρκεια ανάπτυξης των φυτών όσο και στις μέγιστες τιμές (4,17 και 4,29) που παίρνει ο LAI δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές στους δύο χειρισμούς συμβατικής και βιολογικής καλλιέργειας (διάγραμμα 4.5.3).



Διάγραμμα 4.5.3 Σύγκριση της μεταβολής του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) με το χρόνο (ημερολογιακές ημέρες), σε συμβατική και βιολογική καλλιέργεια γλυκού σόργου, για επίπεδο άρδευσης $I_1 = 145$ mm, όπως προσδιορίστηκε με την έμμεση τεχνική.

Αντιθέτως στο επίπεδο άρδευσης $I_2 = 45$ mm διαπιστώθηκαν διαφορές κυρίως τόσο ως προς τις μέγιστες τιμές του LAI όσο και ως προς το χρόνο που εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές. Οι τιμές του LAI στα πειραματικά τεμάχια με τη βιολογική καλλιέργεια είναι υψηλότερες από εκείνες με τη συμβατική καλλιέργεια (διάγραμμα 4.5.4). Στα πειραματικά τεμάχια με τη βιολογική καλλιέργεια ο LAI έφθασε στη μέγιστη τιμή 3,76 (την $Jd = 258$) μετά από 88 ημερολογιακές ημέρες, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τη συμβατική καλλιέργεια ήταν 2,74 (την $Jd = 242$) μετά από 72 ημερολογιακές ημέρες. Οπότε ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας στο βιολογικό τρόπο διαχείρισης για επίπεδο άρδευσης I_2 ήταν κατά 37,23 % μεγαλύτερος συγκριτικά με το συμβατικό τρόπο καλλιέργειας με διαφορά 16 ημερολογιακών ημερών για την αποκτηση της μέγιστης τιμής του από την έναρξη της καλλιέργειας.



Διάγραμμα 4.5.4 Σύγκριση της μεταβολής του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) με το χρόνο (ημερολογιακές ημέρες), σε συμβατική και βιολογική καλλιέργεια γλυκού σόργου, για επίπεδο άρδευσης $I_2 = 45$ mm, όπως προσδιορίστηκε με την έμμεση τεχνική.

Οι διαφορές αυτές στις μέγιστες τιμές του LAI και στο χρόνο που εμφανίζονται, παρατηρούνται στην περίπτωση που έχουμε καταπόνηση των φυτών λόγω έλλειψης νερού. Είναι γνωστό ότι η καλλιέργεια του γλυκού σόργου δέχεται ποσότητες νερού για πλήρη άρδευση από 400-500 mm. (Dercas *et al.*, 1995). Στην περίπτωση μας η προσθήκη μόνο 45 mm περίπου νερού δημιουργεί κατάσταση έντονης έλλειψης νερού στη ριζόσφαιρα της καλλιέργειας. Είναι προφανές ότι στους χειρισμούς του εδάφους που θα ευνοούν τη διατήρηση της εδαφικής υγρασίας οι επιπτώσεις από την έλλειψη του νερού θα είναι λιγότερο αρνητικές. Επίσης είναι γνωστό ότι η αυξημένη παρουσία οργανικής ουσίας στο έδαφος δημιουργεί προϋποθέσεις διατήρησης της υγρασίας του εδάφους και επομένως μικρότερες επιπτώσεις της έλλειψης νερού στην ανάπτυξη των φυτών του σόργου και ειδικά στο LAI.

Σε καλλιέργεια γλυκού καλαμποκιού, όπως αναφέρουν οι Stone *et al.* (2001) η έλλειψη νερού επηρέασε την ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας σε βαθμό που εξαρτήθηκε από τη χρονική και αυστηρή εφαρμογή του. Η έλλειψη νερού στο αρχικό στάδιο της καλλιέργειας επηρέασε το ρυθμό ανάπτυξης του φύλλου, χωρίς να έχει

διάρκεια, και επομένως περιορίστηκε και ο LAI. Με την μέτρια έλλειψη του νερού δεν υπήρχε σημαντικός περιορισμός στη μέγιστη τιμή του LAI, αλλά επιτάχυνση της γήρανσης των φύλλων. Με την αυστηρή έλλειψη νερού σε μετέπειτα στάδιο της καλλιέργειας παρατηρήθηκε περιορισμός στην ανάπτυξη της καλλιέργειας με μείωση του LAI και επιτάχυνση της γήρανσης των φύλλων.

Σε ότι αφορά την σύγκριση των τιμών του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με τιμές σε άλλες εργασίες μπορούμε να πούμε τα εξής: Οι μέγιστες τιμές που αναφέρουν οι Mastroilli *et al.* (1995), για συμβατική καλλιέργεια γλυκού σόργου (c.v. Keller), που είχε εγκατασταθεί στην περιοχή του Μπαρί της Ιταλίας (περιοχή Rutigliano) για τέσσερις συνεχείς χρονιές (1990-1993) παρουσιάζονται στο ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 4.5.2 Οι μέγιστες τιμές του LAI που παρατηρήθηκαν σε καλλιέργεια *Sorghum bicolor* (cv. Keller) στην Νότια Ιταλία (Mastroilli *et al.*, 1995).

| Πυκνότητα φύτευσης φυτών: 11,5 φυτά /m ² | | |
|-----------------------------------------------------|----------------|------------------|
| Χρονιές | Ημέρα φύτευσης | Μέγιστη τιμή LAI |
| 1990 | 134 | 6,6 |
| 1991 | 112 | 5,8 |
| 1992 | 120 | 6,8 |
| 1993 | 142 | 6,1 |

Οι παραπάνω τιμές αφορούν μέτρησεις με καταστρεπτική μέθοδο. Οι τιμές του LAI είναι σαφώς μεγαλύτερες από αυτές που προσδιορίστηκαν στην συμβατική και βιολογική καλλιέργεια μας, κάτι που αποδίδεται αφενός στην μεγαλύτερη πυκνότητα φύτευσης και αφετέρου στη χρησιμοποίηση μεγαλύτερης ποσότητας χημικών λιπασμάτων.

Στον Ελλαδικό χώρο και σε ότι αφορά την ποικιλία Keller η εικόνα που έχουμε, για τις μέγιστες τιμές που φθάνει ο δείκτης LAI, είναι περίπου ίδια.. Σε συμβατική καλλιέργεια γλυκού σόργου, που είχε εγκατασταθεί στην Κεντρική Ελλάδα αναφέρεται μέγιστη τιμή LAI, η τιμή 6,3 την 263 ημέρα. Οι γραμμές αυτής της καλλιέργειας απείχαν μεταξύ τους 0,70 m, ενώ η φύτευση των φυτών στις γραμμές είχε πραγματοποιηθεί ανά 0,15 m (Dalianis *et al.*, 1996).

Οι μέγιστες τιμές που αναφέρουν οι Καβαδάκης κ. ά., (1997) για συμβατική καλλιέργεια γλυκού σόργου (c.v. Keller), που είχε εγκατασταθεί στην περιοχή Βάγια Βοιωτίας, ήταν περίπου 6,2 (κατά την αρχή της άνθησης) για τα λιπασμένα τεμάχια, ενώ η αντίστοιχη τιμή για τα μη λιπασμένα τεμάχια ήταν 4,4. Όσο αναφορά την άρδευση, ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας δεν επηρεάστηκε από αυτή. Οι ίδιες μέγιστες τιμές (5,6) παρατηρήθηκαν κατά την αρχή της άνθησης και στα δύο επίπεδα άρδευσης ($I_1 = 240$ mm, $I_2 = 320$ mm). Οι τιμές αυτές αφορούν μέτρηση με καταστρεπτική μέθοδο (συσκευή Mark 2 Area Meter).

Η αντίστοιχη τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας σε βιολογική καλλιέργεια σόργου που είχε εγκατασταθεί σε κοντινό χώρο (Πανεπιστήμιο Πατρών) κατά το έτος 2000 ήταν 4,6 και παρατηρήθηκε την ημερολογιακή ημέρα $J = 229$. Η σπορά των φυτών της καλλιέργειας αυτής είχε πραγματοποιηθεί νωρίτερα την ημέρα $J = 145$, ενώ και οι αποστάσεις μεταξύ των γραμμών ήταν μεγαλύτερες (0,80 m) (Τσαγκάρης, 2000).

Σε βιολογική καλλιέργεια γλυκού σόργου, που είχε εγκατασταθεί σε κοντινό χώρο (Πανεπιστήμιο Πατρών) κατά το έτος 2000 αναφέρεται μέγιστη τιμή LAI, η τιμή 3,1 την 251 ημέρα. Η τιμή αυτή αφορά την μέγιστη τιμή που έδειξε ο αναλυτής LAI-2000, ενώ με την καταστρεπτική μέθοδο η τιμή του ήταν πολύ μεγαλύτερη φθάνοντας τα 4,22 την 248 ημέρα. Οι γραμμές αυτής της καλλιέργειας απείχαν μεταξύ τους 0,70 m, ενώ η φύτευση των φυτών στις γραμμές είχε πραγματοποιηθεί ανά 0,20 m, όπως και στην καλλιέργειά μας. Η σπορά του σόργου έγινε στις 2 Ιουνίου του έτους 2000 (154) (Ασπρούδας, 2001).

5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Θέλοντας να αξιολογήσουμε γενικότερα τα αποτελέσματα που συζητήθηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούμε να παρουσιάσουμε τα παρακάτω συμπεράσματα τα οποία αφορούν τις βασικές παραμέτρους που μετρήθηκαν.

1. Ήδη στο θεωρητικό μέρος έχουμε αναφέρει τη σημασία του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στη αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας από την καλλιέργεια. Από τη σύγκριση των μεταβολών του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με το χρόνο, σε συμβατική και βιολογική καλλιέργεια γλυκού σόργου στα πειραματικά τεμάχια που δέχτηκαν ποσότητα νερού περίπου 190 mm (άρδευση $I_1 = 145$ mm συν 44 mm ύψος βροχόπτωσης) δεν διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές όσο αναφορά τις μέγιστες τιμές που λαμβάνει ο LAI και στους δύο χειρισμούς. Το σημαντικό είναι ότι με τη σχεδόν μισή ποσότητα νερού σε σχέση με την αντίστοιχη που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ότι δέχεται η καλλιέργεια (400 mm) ελήφθησαν αποδόσεις και τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) σχετικά καλές.
2. Αντιστοίχως για τα πειραματικά τεμάχια που δέχθηκαν ποσότητα νερού περίπου 90 mm ($I_2 = 45$ mm συν 44 mm ύψος βροχόπτωσης), διαπιστώθηκαν διαφορές κυρίως τόσο ως προς τις μέγιστες τιμές που λαμβάνει ο LAI όσο και ως προς το χρόνο που εμφανίστηκαν οι μέγιστες τιμές. Οι τιμές του LAI στα πειραματικά τεμάχια με τη βιολογική καλλιέργεια ήταν υψηλότερες από εκείνες της συμβατικής καλλιέργειας κατά 37,23% λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας του εδάφους σε οργανική ουσία κατά 12% σε σχέση με το συμβατικό τρόπο διαχείρισης της καλλιέργειας. Βέβαια το θέμα αυτό χρειάζεται περισσότερη διερεύνηση όσον αναφορά τις καλλιεργητικές πρακτικές που ακολουθούνται.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι μεταβολές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI) σε φυτά γλυκού σόργου [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], ποικιλίας keller που καλλιεργήθηκαν με δυο τρόπους διαχείρισης (συμβατική και βιολογική) και κάτω από την επίδραση δύο επιπέδων στάγδην άρδευσης ($I_1 = 145$ mm, $I_2 = 45$ mm). Η διεξαγωγή του πειράματος έλαβε χώρα στην ευρύτερη περιοχή του Πανεπιστημίου των Πατρών.

Για τον προσδιορισμό της μεταβολής του LAI με το χρόνο στην καλλιέργεια του γλυκού σόργου, χρησιμοποιήθηκε ο αυτοματοποιημένος αναλυτής φυτικής κόμης LAI-2000 (Plant Canopy Analyzer) της εταιρίας LI-COR, Lincoln, NE, USA, που κατηγοριοποιείται στις έμμεσες μεθόδους μέτρησης και συγκεκριμένα στην τεχνική μελέτης των κενών της φυτικής κόμης (gap fraction analysis).

Από την επεξεργασία των δεδομένων δε διαπιστώθηκαν σημαντικές διαφορές όσο αναφορά τις μέγιστες τιμές που λαμβάνει ο LAI και στους δύο χειρισμούς για το επίπεδο άρδευσης I_1 . Αντιθέτως οι τιμές του LAI στα πειραματικά τεμάχια με τη βιολογική καλλιέργεια, για το επίπεδο άρδευσης I_2 ήταν υψηλότερες από εκείνες της συμβατικής καλλιέργειας κατά 37,23%.

SUMMARY

In the present work were studied the changes of leaf area index (LAI) of sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], variety keller that was cultivated with two cultivation practices (conventional and biological) and under the effect of two drip irrigation rates ($I_1 = 145$ mm, $I_2 = 45$ mm). The experiment become in the wider area of University of Patras.

For the determination of change of LAI the by the time in the cultivation of sweet sorghum, was used the automatic Plant Canopy Analyzer LAI-2000 the company LI-COR, Lincoln, NE, USA, that is categorized in the indirect methods of measurement and concretely in the technique of canopy gap fraction analysis.

By the analysis of data were not realised important differences in the maximum value that receives the LAI both of cultivation practices for high irrigation rate I_1 , whereas the value of LAI in the experimental fields with the biological cultivation for the low irrigation rate I_2 were higher than those of conventional cultivation at 37,23%.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**Διεθνείς αναφορές:**

- Campbell, G.S. & Norman, J.M. (1988). The description and measurement of plant canopy structure. In: Plant canopies: Their growth, form and function. (eds G. Russell, B. Marshall and P.G. Jarvis). Cambridge University Press, Cambridge. pp 1-19.
- Campbell, G.S. & Norman, J.M. (1998). An introduction to Environmental Biophysics. Springer - Verlag, New York.
- Dalianis, C., Panoutsou, C. & Dercas, N. (1996). Sweet and fibber sorghum, two promising biomass crops. In: First European Seminar on sorghum for energy and Industry, Toulouse, France- April 11-3, 1996, pp 173-176.
- Daughtry, S.T.C. (1990). Direct measurements of canopy structure. Remote sensing reviews, 5 (1), pp 45-60.
- De Wet, J.M.J., Harlan J.R., & Price, E.G. (1970): Origin of variability in the Spontanea complex of Sorghum bicolor. American Journal of Botany 57 (6), pp 704-707.
- Dercas N., Panoutsou C., Dalianis C. & Sooter C., 1995. Sweet Sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) Response to Four Irrigation and Two Nitrogen Fertilization Rates. Center for Renewable Energy Sources, Pikermi , Greece.
- deWit, C.T. (1965). Photosynthesis of leaf canopies. Agric. Res. Rep. no. 663. Centrer for Agriculture Publication and Documentation, Wageningen, The Netherlands.
- Fuchs, M., Stanhill G. & Moreschet S. (1976). Effect of increasing foliage and soil reflectivity on the solar radiation balance of wide-row sorghum. Agronomy Journal,(68), pp 865-871.

- Hay, R.K.M & Walker, A.J. (1989). Canopy architecture and interception of solar radiation. In: An introduction to the physiology of crop yield. Longman Scientific & Technical, Essex, U.K.
- Jones, H.G. (1992). Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press.
- Kvet J., Ondok J. P., Necas J. & Jarvis P. J. 1971. Methods of growth analysis. In: Plant Photosynthesis Production, Manual of methods. (eds Z. Sestak, J. Catsky and P.G. Jarvis). W. Junk, The Hague. pp 344-391.
- Lemaire G. & Chartier M., (1996). Productivity models of sorghum crops. In: First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry, Toulouse, France, April 1-3, pp 42-46.
- Mastrorilli, M., Katerji, N., Rana, G. & Steduto P. (1995). Sweet sorghum in Mediterranean climate: radiation use and biomass water use efficiencies. Industrial crops and products (3), pp 253-260.
- Miller, J.B. (1967). A formula for average foliage density. Australian Journal of Botany. (15), pp 141-144.
- Nobel, P.S., Forseth, I.N. & Long, S.P. (1993). Canopy structure and light interception. In: Photosynthesis and Production in a Changing Environment. A field and laboratory manual. (eds D.O. Hall, J.M.O. Scurlock, H.R. Bolhar-NordenKampf, R.C. Leegood and S.P. Long). Chapman and Hall, London and New York. pp 79-80.
- Norman, J.M. & Campbell, G.S. (1989). Canopy Structure In: Plant Physiological Ecology: Field methods and instrumentation. (eds R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney, and P.W. Rundel). Chapman and Hall, London and New York. pp 301-325.
- Ross, J. (1981). The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands. W. Junk, The Hague.

- Soontornchainaksaeng P., Gosse G., Chartier M. (1996). A new leaf area kinetics sub-model in CERES-Sorghum. In: First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry, Toulouse, France, April 1-3, pp 253-257.
- Stone, P.J., Wilson, D.R., Jamieson, P.D., Gillespie, R.N. (2001). Water deficit effects on sweet corn. II. Canopy development Australian Journal of Agricultural Research, (52), pp 115-126.
- Watson, D.J. 1958. The dependence of net assimilation rate on leaf area index. Ann. Bot. (22), pp 37-54.
- Welles, J.M. & Norman, J .M. (1991). Instrument for Indirect Measurement of Canopy Architecture. Agronomy Journal, (83), pp 818-825.

Ελληνικές αναφορές:

- Αλιφραγκής Δ.Α. & Παπαμίχος Ν.Θ. (1995). Περιγραφή - Δειγματοληψία, Εργαστηριακές αναλύσεις δασικών εδαφών και φυτικών ιστών. Εκδόσεις Δεδούση, Θεσσαλονίκη.
- Ασπρούδας Ν., (2001). Μελέτη της κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας και προσδιορισμός παραμέτρων δομής στη φυτική κόμη βιολογικής καλλιέργειας γλυκού σόργου [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. Διατριβή ειδίκευσης στις Περιβαλλοντικές Επιστήμες, Σχολή Θετικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Καβαδάκης Γ., Νικολάου Α., Αλεξοπούλου Ε., Νατιώτη Ε., Μήτσιου Χ., Πανούτσου Κ., Δαναλάτος Ν. (1997): Ανάπτυξη και παραγωγικότητα βιομάζας και σακχάρων καλλιέργειας γλυκού σόργου (cv. Keller) στην Κεντρική Ελλάδα. 2ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής. Βόλος 28-30/09/2000. Εταιρία Γεωργικών Μηχανών Ελλάδος.
- Τσαγκάρης Γ., (2000). Παραγωγή βιομάζας/ βιαιθανόλης από καλλιέργεια γλυκού σόργου [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]: Προσδιορισμός του συντελεστή αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας και της παραγωγικότητας της καλλιέργειας. Διατριβή ειδίκευσης στις Περιβαλλοντικές Επιστήμες, Σχολή Θετικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

Δικτυακές πηγές:

http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/lbrtde.html

<http://insects.tamu.edu:7998/imagedb/search.html>

<http://muextension.missouri.edu/explore/agguides/pests/g07113.htm>

<http://www.distill.com/berg/>

http://www.licor.com/env/Products/AreaMeters/lai2000/2000_intro.jsp

<http://www.mainsection.asp.html>

<http://www.nda.agric.za/docs/Sorghum/sorghum.htm>

<http://www.pherobase.com/database/species-Sesamia-nonagrioides.html>

<http://www.sorghumanthracnose.org/diseases.html>

<http://www.sorghumanthracnose.org/index.shtml>

http://www.uni-hohenheim.de/%7Eipsp_www/350b/indexe.html

Βοηθήματα:

- [1]. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Technical Information. LI-COR, inc. 1989.
- [2]. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, for rapid, non-destructive Leaf Area Index measurements. LI-COR, inc. 1990.
- [3]. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction manual. LI-COR, inc. 1991.

