

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ
& ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
Αριθ. Πρωτ. 142
Ημερομηνία 5-10-2000

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΕΓΓΕΙΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΠΝΟΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΜΑΤΙΚΗΣ
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΦΥΤΩΝ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ ΥΠΟ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΟ
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΠΟΡΟΜΕΤΡΟ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΚΑΒΟΥΡΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ-ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΙΤΤΑΣ

ΒΟΛΟΣ 2000



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 1647/1

Ημερ. Εισ.: 23-10-2003

Δωρεά:

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ ΓΦΖΠ

2000

ΚΑΒ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070351

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΖΩΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΕΓΓΕΙΩΝ ΒΕΛΤΙΩΣΕΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΠΝΟΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΜΑΤΙΚΗΣ
ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΦΥΤΩΝ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ ΥΠΟ ΚΑΛΥΨΗ ΑΠΟ
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΠΟΡΟΜΕΤΡΟ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΚΑΒΟΥΡΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ : ***ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΙΤΤΑΣ -ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ***
ΘΕΟΦΑΝΗΣ ΓΕΜΤΟΣ -ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΝΑΝΟΣ -ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ

ΒΟΛΟΣ 2000

Στους Γονείς μου,

**Κώστα και Ευαγγελία για την ηθική και
υλική υποστήριξη που μου παρείχαν
καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου, στον Κο Κωνσταντίνο Κίττα Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το γνωστικό αντικείμενο των Γεωργικών Κατασκευών, καθώς και για την ηθική και υλικοτεχνική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων και συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Κο Θεοφάνη Γέμτο Αναπληρωτή Καθηγητή Γεωργικής Μηχανολογίας και τον Κο Γεώργιο Νάνο Επίκουρο Καθηγητή Δενδροκομίας του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ επίσης τον Κο Νικόλαο Κατσούλα, Υποψήφιο Διδάκτορα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την ηθική συμπαράσταση, τη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση και για την πολύτιμη συμβολή του στην αρτιότερη οργάνωση του πειράματος και συγγραφή της παρούσας διατριβής, η οποία και υπήρξε καθοριστική.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και ιδιαίτερα τους: Δρ Παναγιώτη Γιαγλάρα και τον Υποψήφιο Διδάκτορα Θωμά Μπαρτζάνα για την τεχνική υποστήριξη στη διαμόρφωση της διατριβής.

ΛΙΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ΛΑΤΙΝΙΚΟ ΑΛΦΑΒΗΤΟ

<u>Σύμβολο</u>	<u>Επεξήγηση</u>	<u>Μονάδες</u>
C_p	Ειδική θερμότητα του αέρα	$J Kg^{-1}K^{-1}$
E	Πυκνότητα ροής υδρατμών της	$W m^{-2}$
e	Πίεση υδρατμών	kPa
e^*	Πίεση υδρατμών στον κορεσμό σε θερμοκρασία T	kPa
G	Ροή ακτινοβολίας από το έδαφος στο φύλλο μεγάλου μήκους κύματος	$W m^{-2}$
g_a	Αεροδυναμική αγωγιμότητα του φύλλου	$m s^{-1}$ ή σε $mmol m^{-2}s^{-1}$
$g_{c,a}$	Αεροδυναμική Αγωγιμότητα καλλιέργειας	$m s^{-1}$ ή σε $mmol m^{-2}s^{-1}$
g_c	Αγωγιμότητα καλλιέργειας	>>
g_s	Στοματική αγωγιμότητα φύλλου	>>
g_l	Ολική αγωγιμότητα φύλλου	>>
H	Ροή αισθητής θερμότητας	$W m^{-2}$
LAI	Δείκτης φυλλικής επιφάνειας	m^2 φύλλων / m^2 εδάφους
P	Βαρομετρική πίεση	kPa
P_s	Το ποσοστό της ακτινοβολίας που χρησιμοποιείται για φωτοσύνθεση	$W m^{-2}$
R_n	Καθαρή ακτινοβολία	$W m^{-2}$
R_s	Ηλιακή ακτινοβολία	$W m^{-2}$
R	Παγκόσμια σταθερά των αερίων	$8.314 Pa m^3 mol^{-1} K^{-1}$
RH	Σχετική υγρασία	(%)
VPD	Έλλειμμα κορεσμού	kPa
r	Αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας και υδρατμών	$s m^{-1}$
T	Θερμοκρασία	K

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΛΦΑΒΗΤΟ

<u>Σύμβολο</u>	<u>Επεξήγηση</u>	<u>Μονάδε</u>
γ	Ψυχομετρική σταθερά	$kPa K^{-1}$
γ^*	$= \gamma (1 + g_a/g_s)$	$kPa K^{-1}$
Δ	Κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών του αέρα, στη θερμοκρασία του αέρα	$kPa K^{-1}$
λ	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης νερού	2454 J kg
λ'	Μήκος κύματος	μ .
ρ	Πυκνότητα του αέρα	$kg m^{-3}$

ΔΕΙΚΤΕΣ

<u>Σύμβολο</u>	<u>Επεξήγηση</u>
a	Αέρας
c	Καλλιέργεια
cuv	Κουβέτα
eq	Ισορροπία
imp	Επιβαλλόμενη
l	Φύλλο
m	Μοριακές μονάδες
v	Μονάδες ταχύτητας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ	12
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	13
1.1 Το Περιβάλλον –Κλίμα του θερμοκηπίου.....	13
1.2 Ισοζύγιο ενέργειας στο θερμοκήπιο.....	13
1.2.1 Γενικά.....	13
1.2.2 Ισοζύγιο ενέργειας στο επίπεδο του φύλλου	14
1.2.3 Λαθάνουσα και αισθητή θερμότητα.....	15
1.2.4 Ισοζύγιο ενέργειας στο επίπεδο της καλλιέργειας	18
1.3 Διαπνοή και στοματική αγωγιμότητα σε σχέση με το μικροκλίμα του θερμοκηπίου.....	19
1.3.1 Διαπνοή και μικροκλίμα.....	19
1.3.2 Επίδραση της ακτινοβολίας, της υγρασίας και της θερμοκρασίας αέρα στη διαπνοή.....	20
1.3.3 Στοματική αγωγιμότητα και μικροκλίμα.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ “Ω” ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ	
ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ CWSI	24
2.1 Βαθμός σύνδεσης της διαπνοής φύλλου με την ατμόσφαιρα-Παράγοντας “Ω”.....	24
2.1.1 Γενικά	24
2.1.2 Διαπνοή στο επίπεδο του φύλλου	25
2.1.3 Σύνδεση φύλλου με το περιβάλλον-Παράγοντας “Ω”	26
2.1.4 Διαπνοή στο επίπεδο της καλλιέργειας	28
2.1.5 Έλεγχος των στομάτων σε συνθήκες θερμοκηπίου.....	30
2.2 Δείκτης υδατικής κατάστασης της Καλλιέργειας (CWSI).....	30
2.2.1 Γενικά	30
2.2.2 Ισοζύγιο Ενέργειας –Χρήση των διαφορών θερμοκρασίας καλλιέργειας- αέρα στον	
προσδιορισμό του CWSI.	31
2.2.3 Σφάλματα κατά την εκτίμηση του δείκτη υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας.....	33
ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ	34
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΠΝΟΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΜΑΤΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ	
ΠΟΡΟΜΕΤΡΟ.....	35
3.1 Γενικά.....	35
3.2 Παρουσίαση λειτουργίας του Πορομέτρου LI –1600M.....	35
3.2.1 Παρουσίαση –Περιγραφή.....	35
3.2.2 Υπολογισμός της Διαπνοής και Στοματικής Αγωγιμότητας	39
3.3 Πηγές λάθους στην εκτίμηση της Διαπνοής και της Στοματικής Αγωγιμότητας με χρήση	
πορομέτρου.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	43
4.1 Περιγραφή θερμοκηπίου και καλλιέργειας	43
ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	48
5.1 Διαπνοή.....	48
5.2 Στοματική αγωγιμότητα.....	51
5.3 Παράγοντας Ω και CWSI.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ –ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	58

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Υπάρχει στενή σχέση μεταξύ των μεταβλητών που ορίζουν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου και της διαπνοής μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας. Οι μεταβλητές αυτές είναι η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στο επίπεδο της καλλιέργειας, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, η θερμοκρασία του αέρα, η συγκέντρωση του CO₂ κ.ά. Οι μεταβλητές αυτές επιδρούν στις διάφορες φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών (π.χ. διαπνοή, φωτοσύνθεση), με αλλαγή της τιμής τους τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Από την άλλη πλευρά η διαπνοή της καλλιέργειας είναι ο κυριότερος παράγοντας τροποποίησης του μικροκλίματος λόγω της συμμετοχής της στο ισοζύγιο ενέργειας, μέσω της ψύξης με εξάτμιση. Η μελέτη της αμφίδρομης αυτής σχέσης μεταξύ διαπνοής της καλλιέργειας και μεταβλητών που ορίζουν το μικροκλίμα, επιτρέπει τη δυνατότητα περαιτέρω διερεύνησης του τρόπου διαμόρφωσης του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, ενώ παράλληλα βοηθά στη βελτίωση του ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου. Προκειμένου να γίνει δυνατή η μελέτη της επίδρασης της διαπνοής και της καλλιέργειας γενικότερα στο κλίμα του θερμοκηπίου, έγιναν μετρήσεις της διαπνοής και της στοματικής αγωγιμότητας σε υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς διαμορφωμένη με την τεχνική “shoot bending”. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε γυάλινο πειραματικό θερμοκήπιο του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας το καλοκαίρι (Ιούνιο-Ιούλιο) και το φθινόπωρο (Οκτώβριος) του έτους 1999. Παράλληλα έγιναν μετρήσεις της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας φύλλων και αέρα και της σχετικής υγρασίας του αέρα και προσδιορισμός του ελλείμματος κορεσμού του αέρα και των φύλλων. Οι παραπάνω μετρήσεις έγιναν με χρήση πορομέτρου. Επιπλέον έγιναν μετρήσεις διαπνοής με χρήση λυσιμέτρου, για σύγκριση με εκτιμήσεις από το πορόμετρο. Οι μετρήσεις επέτρεψαν τη μελέτη της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στη διαπνοή και στοματική αγωγιμότητα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τόσο η στοματική αγωγιμότητα όσο και η διαπνοή αυξάνονταν με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας σημειώνοντας τις μέγιστες τιμές κατά τις ώρες 11:00 και 13:30 αντίστοιχα, ενώ στη συνέχεια λόγω αύξησης του ελλείμματος κορεσμού του αέρα πάνω από την τιμή των 2 kPa, η αγωγιμότητα μειωνόταν σημαντικά. Παρατηρήθηκε μια διαφορά φάσης μεταξύ αγωγιμότητας και διαπνοής, με την αγωγιμότητα να αποκτά τη μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια να

μειώνεται, περίπου 2.5 ώρες νωρίτερα από τη διαπνοή. Εκτιμήθηκε ο βαθμός σύνδεσης της καλλιέργειας με τον περιβάλλοντα αέρα, μέσω του υπολογισμού του παράγοντα σύζευξης Ω . Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η καλλιέργεια δεν ήταν συζευγμένη με τον αέρα και η διαπνοή οφειλόταν στην ακτινοβολία, ενώ τα αποτελέσματα ήταν κοντά σε αυτά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Ο υπολογισμός του δείκτη υδατικής κατάστασης (CWSI), έδειξε ότι η καλλιέργεια βρισκόταν σε μια μέση υδατική κατάσταση καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Τέλος, η σύγκριση των μετρήσεων της διαπνοής με το πορόμετρο, με τις μετρήσεις του λυσιμέτρου έδειξε ότι η διαπνοή ήταν περίπου ίδια για φύλλα μέσης ηλικίας (30-45 ημερών) ενώ τα νέα φύλλα που βρίσκονταν σε ανθοφόρους βλαστούς, διέπνεαν με διπλάσιο ρυθμό σε σχέση με τα παλαιότερα που βρίσκονταν σε λυγισμένους βλαστούς.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η καθαρή ενέργεια που δέχεται κάθε φυτική μάζα μετατρέπεται κυρίως σε αισθητή και λανθάνουσα ενέργεια, ενώ παράλληλα αυτό που καθορίζει το ποσοστό της ενέργειας που μετατρέπεται στη μια ή την άλλη μορφή είναι η συμπεριφορά των στομάτων. Προκειμένου να γίνει εφικτός ο υπολογισμός των ποσοστών αυτών, μεταξύ άλλων προσεγγίσεων, χρησιμοποιείται ευρύτατα η παραδοχή του «μεγάλου φύλλου» («big leaf»), όπως δίδεται από την εξίσωση των Penman –Monteith (Monteith., 1981). Σύμφωνα με την παραδοχή αυτή, η συνολική στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας αντιπροσωπεύεται από μια τιμή η οποία θεωρείται ότι είναι συγκρίσιμη με αυτή του απλού φύλλου και επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες.

Η στοματική αγωγιμότητα στο επίπεδο του φύλλου ή της καλλιέργειας έχει συσχετιστεί με την ηλιακή ακτινοβολία, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση CO₂ στον αέρα καθώς και το υδατικό δυναμικό του φύλλου. Για την επίδραση του περιβάλλοντος πάνω στη στοματική αγωγιμότητα έχουν προταθεί διάφορα εμπειρικά κυρίως μοντέλα (Jarvis, 1976, Jones, 1983, Avissar et al., 1985, Stanghellini, 1987). Η πιο κοινή εξίσωση που περιγράφει την επίδραση αυτή είναι η εξίσωση του Jarvis (Jarvis, 1976), στην οποία η στοματική αγωγιμότητα εκφράζεται ως μια μέγιστη αγωγιμότητα που πολλαπλασιάζεται με μερικούς από τους προαναφερθέντες παράγοντες, οι οποίοι δρουν πολλαπλασιαστικά για το τελικό αποτέλεσμα. Διάφορες έρευνες έχουν δείξει ότι τα στόμα αντιδρούν στους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως ακτινοβολία, θερμοκρασία αέρα, έλλειμμα κορεσμού αέρα, συγκέντρωση CO₂ και υγρασία (Schulze & Hall, 1982; Schulze, 1986). Παρ' όλα αυτά δεν μέχρι αποσαφηνιστεί η φυσιολογική βάση της απ' ευθείας επίδρασης της υγρασίας του αέρα (ακόμα και της ταχύτητας του αέρα) στη συμπεριφορά των στομάτων. Υπάρχουν ενδείξεις (Bunce, J.A., 1985; Aphalo P.J. & Jarvis P.G., 1993), που συνηγορούν στο γεγονός ότι η φαινομενική αντίδραση των στομάτων στην υγρασία (ή τον αέρα), είναι αποτέλεσμα της τροποποίησης των ιδιοτήτων του επιφανειακού στρώματος πάνω από τα φύλλα ή την καλλιέργεια. Εντούτοις φαίνεται ότι τα στόματα αντιδρούν στο ρυθμό της διαπνοής και όχι στην υγρασία αυτή καθ' αυτή (Monteith, 1995).

Η στοματική αγωγιμότητα αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο ισοζύγιο νερού, ενέργειας και φωτοσύνθεσης (Pearcy et al., 1989). Τιμές της στοματικής αγωγιμότητας μπορεί να μετρηθούν μεταξύ άλλων και με τη μέθοδο της πορομετρίας. Παράλληλα η πορομετρία επιτρέπει την εκτίμηση της υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας. Παρ' όλα αυτά, σε πολλές εργασίες τα αποτελέσματα της σύγκρισης της αγωγιμότητας, όπως αυτή εκτιμάται με το πορόμετρο, με την αγωγιμότητα όπως αυτή εκτιμάται με άλλες μεθόδους, δεν είναι ικανοποιητικά (Idso et.al., 1986, Idso et.al., 1987, Verhoef A., 1997). Ο Verhoef (1997) βρήκε ότι οι τιμές της αγωγιμότητας που μέτρησε με το πορόμετρο διέφεραν σημαντικά από τις τιμές που μέτρησαν οι Hanan and Prince (1997), με άλλες μεθόδους, στην ίδια καλλιέργεια και την ίδια τοποθεσία. Επιπλέον τιμές της αγωγιμότητας της καλλιέργειας που υπολογίστηκαν από μετρήσεις με το πορόμετρο, λαμβάνοντας υπ' όψη τη φυλλική επιφάνεια (LAI), ήταν μεγαλύτερες κατά έναν παράγοντα 2–3 από αυτές που υπολογίστηκαν με αντιστροφή της εξίσωσης Penman –Monteith, χρησιμοποιώντας μετρήσεις της διαπνοής (Huntingford et al., 1995). Ωστόσο αρκετοί ερευνητές (Day W., 1977 –Landsberg et al., 1975, Monteith J.L., 1990, Paw et al., 1984, Tan et.al., 1978, Watts W.R., 1977), έχουν υποστηρίξει ότι οι εκτιμήσεις της αγωγιμότητας με τη χρήση της πορομετρίας, βρίσκονται σε συμφωνία με εκτιμήσεις με χρήση άλλων μεθόδων.

Ο βαθμός στον οποίο η διαπνοή μιας καλλιέργειας ελέγχεται από τα στόματα, εξαρτάται από το βαθμό σύζευξης μεταξύ των φύλλων και του περιβάλλοντος αέρα. Ο παράγοντας που περιγράφει το βαθμό της σύζευξης, δηλαδή τη σχετική συνεισφορά των παραγόντων ακτινοβολίας και μεταφοράς στη διαπνοή της καλλιέργειας, είναι ο παράγοντας Ω (Jarvis, 1985). Όπως υποστήριξε στην ανάλυσή του ο Jarvis ο παράγοντας Ω μπορεί να παίρνει τιμές από 0 έως 1. Όταν το φύλλο δεν είναι συζευγμένο με τον περιβάλλοντα αέρα τότε παίρνει τιμές κοντά στο 1 (μικρή στοματική αγωγιμότητα) και η διαπνοή οφείλεται σε παράγοντες ακτινοβολίας, ενώ όταν το φύλλο είναι συζευγμένο με τον αέρα τότε παίρνει τιμές κοντά στο 0 (μεγάλη στοματική αγωγιμότητα) τότε η διαπνοή οφείλεται σε παράγοντες μεταφοράς (έλλειμμα κορεσμού, ταχύτητα ανέμου, στοματική αγωγιμότητα).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι, με τη βοήθεια μετρήσεων με το πορόμετρο, να παρουσιάσει και να συζητήσει την επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή και τη στοματική αγωγιμότητα μιας υδροπονικής καλλιέργειας

τριανταφυλλιάς, όπως αυτή παρουσιάζεται από μετρήσεις με πορόμετρο. Επιπλέον παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σύγκρισης της εκτίμησης της διαπνοής με χρήση πορομέτρου και της εκτίμησης της διαπνοής με χρήση λυσιμέτρου.

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

1.1 Το Περιβάλλον –Κλίμα του θερμοκηπίου

Ο όρος "Κλίμα" θερμοκηπίου, έχει χρησιμοποιηθεί προκειμένου να περιγράψει τις μεταβλητές που συνθέτουν το περιβάλλον του θερμοκηπίου όπως : η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η υγρασία, η συγκέντρωση του CO₂ κ.ά., οι οποίοι επηρεάζουν την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών. Το περιβάλλον μπορεί να αναπαρασταθεί από τις μέσες τιμές των μεταβλητών αυτών, οι οποίες μετρούνται στο μέσο ή σε περισσότερα σημεία μέσα στο θερμοκήπιο. Το περιβάλλον που περιγράφεται με αυτόν τον τρόπο ορίζεται ως "μακροκλίμα" του θερμοκηπίου. Στην πραγματικότητα όμως καμία από τις μεταβλητές αυτές δεν παρουσιάζουν ομοιομορφία μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου. Αντίθετα συμβαίνουν πολυάριθμες διαδικασίες στις επιφάνειες των φυτών, εδάφους, υλικών κάλυψης και λοιπού εξοπλισμού, οι οποίες ελέγχονται από ένα είδος "τοπικού" περιβάλλοντος και από τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτές τις επιφάνειες. Το "τοπικό" αυτό περιβάλλον ορίζεται ως "μικροκλίμα" και είναι αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο λόγω της άμεσης αλληλεπίδρασης με την καλλιέργεια. Η διαπνοή της καλλιέργειας, είναι αυτή κυρίως που επιδρά και διαμορφώνει το μικροκλίμα εντός του θερμοκηπίου. Από την άλλη πλευρά το μικροκλίμα, επιδρά με τη σειρά του στην καλλιέργεια, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια ανάδραση στο σύστημα θερμοκήπιο –καλλιέργεια.

1.2 Ισοζύγιο ενέργειας στο θερμοκήπιο

1.2.1 Γενικά

Οι διάφορες μεταβολές που συμβαίνουν στο περιβάλλον του θερμοκηπίου είναι αποτέλεσμα των ανταλλαγών ενέργειας που συμβαίνουν μεταξύ του θερμοκηπίου και του περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου. Η μελέτη των ανταλλαγών ενέργειας βοηθά στην κατανόηση των μεταβολών των επιμέρους μεταβλητών που ορίζουν το μικροκλίμα και

στην αξιολόγηση λύσεων εξοικονόμησης ενέργειας στο θερμοκήπιο. Στην εργασία αυτή ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στη μετάδοση ενέργειας υπό μορφή θερμότητας και μάζας.

1.2.2 Ισοζύγιο ενέργειας στο επίπεδο του φύλλου

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι ενεργειακές ανταλλαγές στο επίπεδο του φύλλου έχουν υιοθετηθεί από πολλούς συγγραφείς υποθέσεις και προσεγγίσεις, πάνω στις οποίες στηρίζονται όλοι οι επιμέρους υπολογισμοί. Έτσι θεωρείται ότι το φύλλο αντιπροσωπεύει μια επίπεδη επιφάνεια από και προς την οποία οι ροές ενέργειας είναι μονοδιάστατες (Monteith, 1990). Επίσης θεωρείται ότι υπάρχει ένα στρώμα περιβάλλοντος αέρα πάνω από την επιφάνεια του φύλλου όπου οι μεταβλητές : έλλειμμα κορεσμού του αέρα, θερμοκρασία αέρα, είναι ομοιόμορφες κατά μήκος του στρώματος αυτού. Το τμήμα του φύλλου που βρίσκεται κάτω από την επιφάνειά του, που έρχεται σε επαφή με αυτό το στρώμα αέρα, θεωρείται κορεσμένη σε υδρατμούς στην θερμοκρασία του.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας η κύρια πηγή ενέργειας του θερμοκηπίου είναι η ηλιακή ακτινοβολία (μικρού μήκους κύματος, $\lambda = 0.2-3.5 \mu$). Όταν η ηλιακή ακτινοβολία (R_s) προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του φύλλου, ένα μέρος της απορροφάται από το φύλλο, ένα μέρος επανεκπέμπεται από αυτό και το υπόλοιπο διέρχεται μέσα από το φύλλο φθάνοντας στο έδαφος. Ως καθαρή ακτινοβολία (R_n) θεωρούμε αυτή που απορροφάται από το φύλλο. Η καθαρή ακτινοβολία που απορροφάται μετατρέπεται κυρίως, σε αισθητή θερμότητα (H) και λανθάνουσα θερμότητα (λE) και ένα μικρό μέρος της χρησιμοποιείται για τη φωτοσύνθεση (P_s). Έτσι σε απλουστευμένη μορφή το ισοζύγιο ενέργειας στην επιφάνεια του φύλλου δίδεται από τη σχέση :

$$R_n = \lambda E + H + P_s \quad (1.1)$$

θεωρώντας ότι το P_s είναι αμελητέο (περίπτωση μετρήσεων για μεγάλα χρονικά διαστήματα), έχουμε :

$$R_n = \lambda E + H \quad (1.2)$$

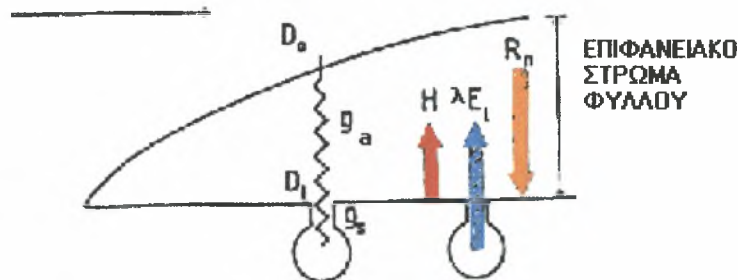
όπου : $R_n =$ είναι η καθαρή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια του φύλλου (Wm^{-2}).

$\lambda E =$ η λανθάνουσα θερμότητα (Wm^{-2}) λόγω εξάτμισης των υδρατμών (διαπνοή), με λ να είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού ($2454 J kg^{-1}$) και E είναι η διαπνοή ($Kg m^{-2}s^{-1}$).

$H =$ η αισθητή θερμότητα (Wm^{-2}) που ελευθερώνεται στον αέρα.

Στην εικόνα 1 φαίνονται οι ανταλλαγές ενέργειας πάνω στην επιφάνεια του φύλλου.

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΕΡΑ



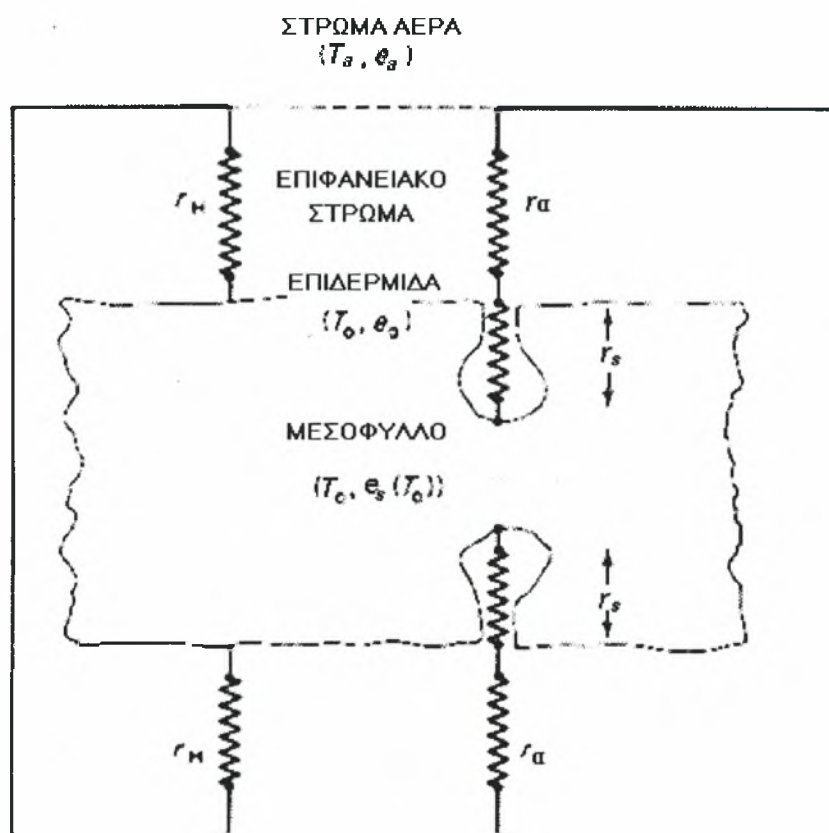
Εικόνα 1. Στην εικόνα 1 παρουσιάζονται σχηματικά η (g_s) στοματική και η αεροδυναμική (g_a) αγωγιμότητα ενός φύλλου πάνω από το οποίο διέρχεται ρεύμα αέρα. Επίσης D_l και D_a είναι το έλλειμμα κορεσμού του φύλλου και του αέρα, αντίστοιχα. H , E_l , R_n είναι η αισθητή, λανθάνουσα θερμότητα και η καθαρή ακτινοβολία, αντίστοιχα.

1.2.3 Λανθάνουσα και αισθητή θερμότητα

Η μεταβολή από την υγρή κατάσταση ενός σώματος στην αέρια, γίνεται με απορρόφηση ενέργειας, γνωστή ως λανθάνουσα ενέργεια. Αν το υγρό είναι σε επαφή με μια επιφάνεια, η ενέργεια θα αφαιρεθεί από την επιφάνεια αυτή με αποτέλεσμα αυτή να

ψυχθεί. Το γεγονός αυτό λαμβάνει χώρα με την εξάτμιση του νερού που περιέχεται στους ιστούς του φύλλου, υπό μορφή υδρατμών, προς τον περιβάλλοντα αέρα. Κατά τη διαδικασία όμως ροής των υδρατμών από το φύλλο προς τον αέρα που το περιβάλλει, παρεμβάλλονται κάποιου είδους αντιστάσεις που δείχνουν το βαθμό ευκολίας που αυτοί μπορούν να αποδοθούν στον περιβάλλοντα αέρα.

Το μέρος της καθαρής ακτινοβολίας που δε μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα, χρησιμοποιείται για τη θέρμανση και αποδίδεται υπό μορφή θερμότητας με συναγωγή στον περιβάλλοντα αέρα. Επίσης στην περίπτωση αυτή υπάρχει αντίσταση κατά τη ροή θερμότητας.



Εικόνα 2. Διαγραμματική απεικόνιση της (r_a) αεροδυναμικής και (r_s) στοματικής αντίστασης, σε φύλλο που διαθέτει στόματα και στις δυο επιφάνειές του.

Στην εικόνα 2 παρουσιάζονται σχηματικά οι αντιστάσεις που αναπτύσσονται στη ροή των υδρατμών (r_a, r_s) και θερμότητας (r_h) καθώς επίσης και τα μέρη εντός και εκτός

του φύλλου όπου οι ενεργειακές ανταλλαγές λαμβάνουν χώρα. Η αντίσταση στη μεταφορά υδρατμών από το εσωτερικό του φύλλου (στοματικές κοιλότητες) στην επιφάνειά του, ονομάζεται στοματική αντίσταση (r_s), ενώ η αντίσταση στη μεταφορά των υδρατμών από την επιφάνεια του φύλλου στον περιβάλλοντα αέρα ονομάζεται αεροδυναμική αντίσταση (r_a). Στο σχήμα θεωρείται ότι $r_a=r_h$, ενώ από εδώ και στο εξής αντί του γενικού όρου αντίσταση θα αναφέρεται ο όρος αγωγιμότητα. Κατ' αναλογία χρησιμοποιούνται οι όροι: στοματική αγωγιμότητα (g_s), αεροδυναμική αγωγιμότητα (g_a) και ολική αγωγιμότητα φύλλου (g_l).

Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι ενώ οι αντιστάσεις είναι προσθετές ($r_l=r_a+r_s$) οι αγωγιμότητες συνδέονται ως εξής: $1/g_l=1/g_a+1/g_s$.

Η σχέση που συνδέει την καθαρή ακτινοβολία με την λανθάνουσα θερμότητα είναι (Monteith, 1973):

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma^*} + \frac{\rho C_p g_a VPD_{l-a}}{\Delta + \gamma^*} \quad (1.3)$$

όπου $\gamma^* = \gamma(1 + g_a/g_s)$

όπου: ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (kg m^{-3}), C_p είναι η ειδική θερμότητα του αέρα (J kg K^{-1}), γ είναι η ψυχομετρική σταθερά (kPa K^{-1}), $VPD_{l-a} [= e_l^* - e_a]$, με e_l^* να είναι η πίεση υδρατμών (kPa) του φύλλου στον κορεσμό, σε θερμοκρασία T_l , e_a η πίεση των υδρατμών του αέρα (kPa) σε θερμοκρασία T_a] είναι το έλλειμμα κορεσμού φύλλου – αέρα (kPa), g_a είναι η αεροδυναμική αγωγιμότητα (m s^{-1}), g_s είναι η στοματική αγωγιμότητα (m s^{-1}) και Δ είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών του αέρα (kPa K^{-1}) στη θερμοκρασία του αέρα T_a .

ενώ η αισθητή θερμότητα δίδεται από τη σχέση:

$$H = \rho C_p (T_l - T_a) g_a \quad (1.4)$$

όπου T_l και T_a είναι η θερμοκρασία του φύλλου και αέρα αντίστοιχα (K).

1.2.4 Ισοζύγιο ενέργειας στο επίπεδο της καλλιέργειας

Όταν πρόκειται να γίνει μελέτη στο επίπεδο της καλλιέργειας, δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα εξαιτίας της ανομοιογένειας μεταξύ των φυτών και της αδυναμίας να περιγραφούν τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτά που αναφέρθησαν πιο πάνω. Παρ' όλα αυτά έχει γίνει αποδεκτή η παραδοχή του "μεγάλου φύλλου" (big leaf) όπως δίδεται από την εξίσωση των Penman –Monteith (1981), η οποία λόγω της απλότητας και της αποδοτικότητάς της, μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα στο επίπεδο της καλλιέργειας. Σύμφωνα με την παραδοχή αυτή η ολική στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας αντιπροσωπεύεται από μια τιμή που είναι συγκρίσιμη και επηρεάζεται από τους ίδιους παράγοντες (όπως αυτή του απλού φύλλου). Επίσης θεωρείται ότι ο αέρας πάνω από την καλλιέργεια είναι ομοιογενής, ενώ η μεταφορά ακτινοβολίας μεταξύ των φυτών είναι μηδενική. Για το λόγο αυτό θεωρούμε την καλλιέργεια ως μια επίπεδη ενιαία πορώδη επιφάνεια.

Έτσι κατ' αναλογία με τους τύπους 1.3 και 1.4 για την καλλιέργεια θα έχουμε :

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma^*} + \frac{\rho C_p g_{c,a} VPD_a}{\Delta + \gamma^*} \quad (1.5)$$

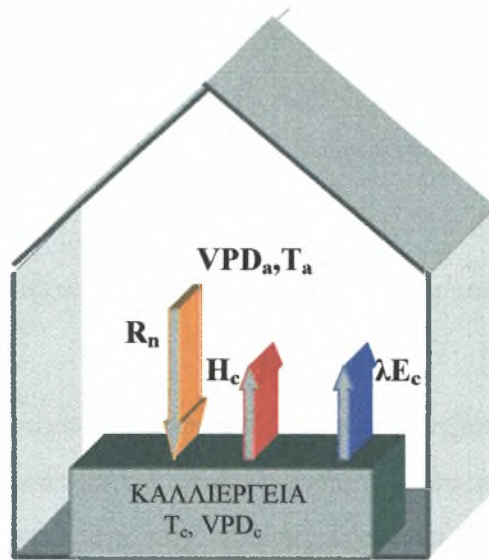
[όπου $\gamma^* = \gamma(1 + g_{c,a}/g_c)$]

και

$$H_c = \rho C_p (T_c - T_a) g_{c,a} \quad (1.6)$$

όπου : VPD_a είναι το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (kPa), g_c και $g_{c,a}$ είναι η στοματική αγωγιμότητα και η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας αντίστοιχα ($m s^{-1}$) και T_c είναι η θερμοκρασία της καλλιέργειας.

Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται σχηματικά οι ανταλλαγές ενέργειας στο θερμοκήπιο, στην επιφάνεια της καλλιέργειας.



Εικόνα 3. Απλοποιημένο σχήμα του ενεργειακού ισοζυγίου της καλλιέργειας

1.3 Διαπνοή και στοματική αγωγιμότητα σε σχέση με το μικροκλίμα του θερμοκηπίου

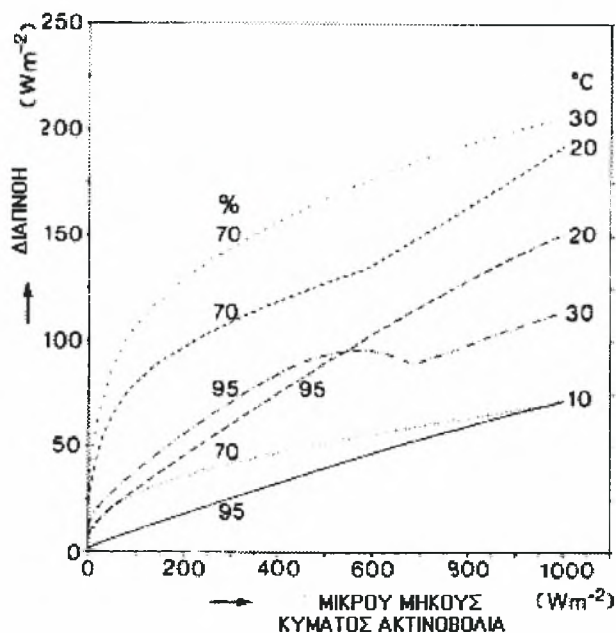
1.3.1 Διαπνοή και μικροκλίμα

Η διαπνοή μιας καλλιέργειας επηρεάζεται κυρίως από τρεις παράγοντες : την διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνειά της, τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα που την περιβάλλει. Η θερμοκρασία επίσης των διαφόρων επιφανειών εντός του θερμοκηπίου, διαμέσου των ανταλλαγών θερμικής ακτινοβολίας (μεγάλου μήκους κύματος), επηρεάζει τη διαπνοή της καλλιέργειας, σε μικρότερο βέβαια βαθμό, κυρίως τις νυχτερινές ώρες. Από την άλλη πλευρά η διαπνοή αποτελεί το κυριότερο παράγοντα τροποποίησης του μικροκλίματος, λόγω της συμμετοχής της στο ισοζύγιο ενέργειας του θερμοκηπίου μέσω της ψύξης με εξάτμιση. Συνεπώς στην περίπτωση που θελήσουμε να βελτιστοποιήσουμε την παραγωγή (ποιότητα, ποσότητα) μιας οποιασδήποτε θερμοκηπιακής καλλιέργειας, αυτό θα ήταν δυνατό μόνο εφόσον μπορούμε να ελέγξουμε τη διαπνοή της καλλιέργειας, μέσω ενός κατάλληλου ελέγχου του μικροκλίματος. Ο κατάλληλος έλεγχος του μικροκλίματος θα μπορούσε να γίνει εφικτός, μόνο στην περίπτωση που η επίδραση του μικροκλίματος στη διαπνοή, είναι γνωστή. Προκειμένου να εξετάσουμε την επίδραση των μεταβλητών του μικροκλίματος

στη διαπνοή της καλλιέργειας, θέτουμε εξ αρχής την προϋπόθεση ότι αυτό είναι δυνατόν μόνο όταν εξετάζουμε κάθε μεταβλητή θεωρώντας τις υπόλοιπες σταθερές.

1.3.2 Επίδραση της ακτινοβολίας, της υγρασίας και της θερμοκρασίας αέρα στη διαπνοή

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπνοή είναι η καθαρή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια της καλλιέργειας. Η αύξηση τόσο της έντασης όσο και της διάρκειας της ακτινοβολίας προκαλεί την αύξηση της διαπνοής, καθώς επίσης και την αύξηση της θερμοκρασίας της καλλιέργειας, όταν οι υπόλοιποι παράγοντες παραμένουν σταθεροί (υγρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα).



Εικόνα 4. Ρυθμός διαπνοής συναρτήσει της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για τρεις τιμές θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα (°C, δεξιό μέρος) και δύο τιμές σχετικής υγρασίας (HR %, αριστερά), για : LAI=3, CO₂=800 ppm, wind speed=9 cm s⁻¹.

Στην εικόνα 4 περιγράφεται η μεταβολή της διαπνοής μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία, για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα. (Stanghellini, 1987)

Από το σχεδιάγραμμα της εικόνας 4 παρατηρούμε ότι για σταθερή θερμοκρασία αέρα μεγαλύτερη διαπνοή παρατηρείται σε χαμηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας. Επιπλέον καθώς η σχετική υγρασία διατηρείται σταθερή με παράλληλη αύξηση της θερμοκρασίας αέρα, υποδηλώνοντας μεγαλύτερο έλλειμμα κορεσμού, η σημασία της σχετικής υγρασίας γίνεται μεγαλύτερη με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Καθώς οι προηγούμενες συνθήκες επικρατούν (αυξανόμενη ακτινοβολία και έλλειμμα κορεσμού, αυξανόμενη θερμοκρασία αέρα και καλλιέργειας), τότε η αύξηση της διαπνοής αποδίδεται στην ικανότητα της καλλιέργειας να προσαρμόζεται στις συνθήκες αυτές, μέσω της εξάτμισης. Έτσι με την εξάτμιση (λανθάνουσα θερμότητα) η καλλιέργεια ψύχεται αποδίδοντας υδρατμούς στον περιβάλλοντα αέρα. Η μείωση της διαπνοής ακολουθεί το κλείσιμο των στομάτων με μια διαφορά φάσης, διότι η διαπνοή αυξάνει με την αύξηση του ελλείμματος κορεσμού μέχρι ενός σημείου, ενώ στη συνέχεια μειώνεται και αυτή.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή παραγωγή (ποιοτική και ποσοτική), οι συνθήκες μέσα στο θερμοκήπιο, πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε να ευνοούνται απρόσκοπτα όλες οι φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών (διαπνοή – φωτοσύνθεση). Στα πλαίσια αυτά και βάση των προαναφερθέντων, ο αντικειμενικός σκοπός ελέγχου των συνθηκών μέσα στο θερμοκήπιο είναι να διατηρήσουμε το έλλειμμα κορεσμού του αέρα σταθερό και σε σχετικά μικρές τιμές (κάτω από την κρίσιμη τιμή 1.5-2 kPa), παράλληλα θα πρέπει η καθαρή ακτινοβολία στο επίπεδο της καλλιέργειας να μην ξεπερνά τα κρίσιμα επίπεδα των 600 –650 W m⁻² (Stanghellini, 1987). Πρέπει επίσης η υδατική κατάσταση της καλλιέργειας να διατηρείται σε άριστα επίπεδα, ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος να προκληθεί υδατικό στρές στα φυτά, ενώ η ζήτηση νερού λόγω φυσιολογικών λειτουργιών και ανάγκες της διαπνοής, πρέπει να καλύπτεται με επαρκή και συνεχή άρδευση.

1.3.3 Στοματική αγωγιμότητα και μικροκλίμα

Η ολική αγωγιμότητα (g_i) αποτελεί μια ένδειξη της ευκολίας διαφυγής των υδρατμών τόσο από τους υποστομάτιους χώρους προς την επιφάνεια του φύλλου (g_s), όσο και από την επιφάνεια του φύλλου προς τον περιβάλλοντα αέρα (g_a). Γίνεται επομένως κατανοητό ότι η καθαρή ακτινοβολία που φθάνει στο επίπεδο της

καλλιέργειας, μετατρέπεται σε λανθάνουσα ή αισθητή θερμότητα, ανάλογα με τη συμπεριφορά των στομάτων.

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη στοματική αγωγιμότητα, έχουν κατά καιρούς προταθεί διάφορα εμπειρικά μοντέλα (Jarvis, 1976, Jones, 1983, Avissar et al., 1985, Stanghellini, 1987). Το μοντέλο του Jarvis παρέχει έναν πρακτικό τρόπο πρόβλεψης της στοματικής αγωγιμότητας συναρτήσει : της ηλιακής ακτινοβολίας (R_s), του ελλείμματος κορεσμού του αέρα (VPD_a), της συγκέντρωσης CO_2 και της θερμοκρασίας αέρα (T_a). Σε φυσιολογική συγκέντρωση CO_2 και σε κατάλληλες υδατικές συνθήκες, το μοντέλο του Jarvis δίδεται ως εξής :

$$g_s = g_{s,max} f_1(R_s) f_2(VPD_a) \quad (1.7)$$

όπου $g_{s,max}$ είναι η μέγιστη στοματική αγωγιμότητα για άριστες συνθήκες περιβάλλοντος θερμοκηπίου και παροχής νερού, εξαρτάται δε από το είδος της καλλιέργειας.

Κατ' αναλογία ορίζεται και για την αγωγιμότητα της καλλιέργειας (g_c) :

$$g_c = g_{c,max} f_1(R_s) f_2(VPD_a) \quad (1.8)$$

[όπου $g_{c,max} = g_{s,max} LAI$]

Έχει βρεθεί (Schulze, 1986, Gutierrez et al., 1994) ότι η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας μειώνεται με την αύξηση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα (με σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους), ενώ με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνεται μέχρις ενός μεγίστου σημείου και στη συνέχεια μειώνεται. Η μείωση αυτή είναι συνέπεια του κλεισίματος των στομάτων. Στο σημείο αυτό γίνεται κατανοητή η σχέση που υπάρχει μεταξύ της στοματικής αγωγιμότητας και της διαπνοής, αφού εξάλλου και τα περισσότερα μοντέλα πρόβλεψης της διαπνοής εμπεριέχουν τον υπολογισμό της.

Ωστόσο πρόσφατες μελέτες (Kittas et.al., 1999, για κλειστό θερμοκήπιο) αποδεικνύουν ότι κυρίαρχο ρόλο στον έλεγχο της διαπνοής, έχει η και αεροδυναμική

αγωγιμότητα της καλλιέργειας ($g_{c,a}$). Η αεροδυναμική αγωγιμότητα επηρεάζεται από την ταχύτητα του ανέμου που διέρχεται πάνω από την καλλιέργεια (ή το φύλλο). Αύξηση της ταχύτητας του αέρα, που διέρχεται πάνω από την επιφάνεια της καλλιέργειας έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται και το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα πάνω από αυτήν, έτσι η $g_{c,a}$ αυξάνεται και οι υδρατμοί διαχέονται ευκολότερα στον αέρα. Η συνέχιση του φαινομένου αυτού έχει ως επακόλουθο την αντίδραση των στομάτων στην απώλεια των υδρατμών και τελικά τη μείωση της g_c , περιορίζοντας έτσι παράλληλα τη διαπνοή αλλά και τη φωτοσύνθεση (μείωση συγκέντρωσης του CO_2 στα φύλλα).

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι μεταξύ των μεταβλητών του μικροκλίματος και της διαπνοής υπάρχει μια αδιαμφισβήτητα στενή σχέση (όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις 1.5 και 1.6).

Όταν η $g_{c,a}$ είναι ο περιοριστικός παράγοντας της διαπνοής στο θερμοκήπιο, η μείωση της g_c δεν επηρεάζει σημαντικά τη διαπνοή της καλλιέργειας. Ο βαθμός κατά τον οποίο που τα στόματα ελέγχουν τη διαπνοή της καλλιέργειας συζητείται σε επόμενο κεφάλαιο, όπου εξετάζεται ο βαθμός σύνδεσης της καλλιέργειας με τον περιβάλλοντα αυτήν αέρα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑ “Ω” ΚΑΙ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ CWSI.

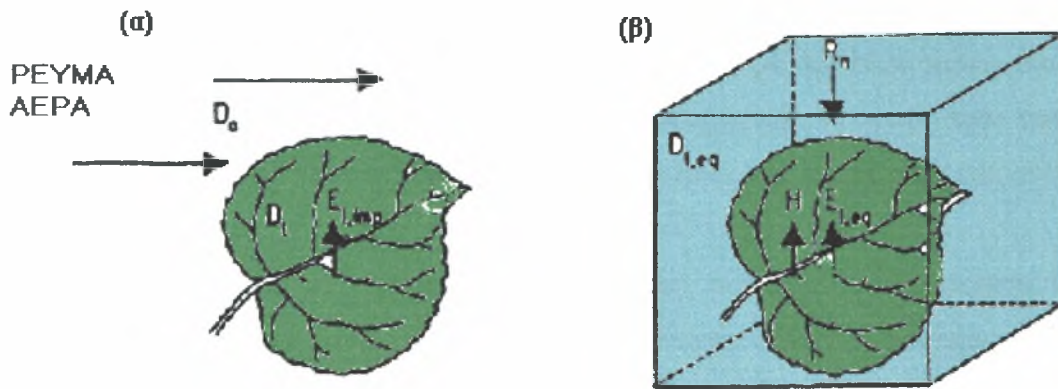
2.1 Βαθμός σύνδεσης της διαπνοής φύλλου με την ατμόσφαιρα-Παράγοντας “Ω”

2.1.1 Γενικά

Ο βαθμός στον οποίο η διαπνοή μιας καλλιέργειας ελέγχεται από τα στόματα εξαρτάται από το βαθμό σύζευξης μεταξύ φύλλων και αέρα (Monteith, 1981).

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα την έννοια του βαθμού σύνδεσης, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα φύλλο πάνω από το οποίο διέρχεται ρεύμα αέρα (εικόνα 8α). Εάν οι συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης ατμών και ελλείμματος κορεσμού στην επιφάνεια του φύλλου ήταν οι ίδιες με αυτές του περιβάλλοντος ρεύματος αέρα, τότε θα υπήρχε τέλεια σύνδεση μεταξύ φύλλου και αέρα (οριακή κατάσταση). Η κατάσταση αυτή θα μπορούσε να προσεγγιστεί αν το φύλλο ήταν πολύ καλά αεριζόμενο, με αποτέλεσμα το επιφανειακό στρώμα να ήταν πολύ λεπτό και ο ρυθμός ανταλλαγής υδρατμών από την επιφάνειά του στον αέρα υψηλός. Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η διαπνοή ελέγχεται από παράγοντες μεταφοράς.

Σε μια εκ διαμέτρου αντίθετη οριακή κατάσταση μπορούμε να θεωρήσουμε ένα φύλλο εντελώς απομονωμένο από το περιβάλλον του (εικόνα 8β). Εξαιτίας της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φύλλο, της θερμότητας με συναγωγή και υδρατμών (λόγω διαπνοής) που συνεχώς θα προστίθενται στον αέρα γύρω από το απομονωμένο φύλλο, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα θα αυξηθούν. Το φύλλο αυτό είναι εντελώς μη συζευγμένο με τον περιβάλλοντα αέρα και η διαπνοή οφείλεται σε παράγοντες ακτινοβολίας.



Εικόνα 5. (α) Πλήρως συζευγμένο φύλλο. Η διαπνοή είναι $E_{l,imp}$ αν το έλλειμμα κορεσμού του φύλλου (D_l) είναι ίδιο με το έλλειμμα κορεσμού του περιβάλλοντος αέρα (D_a), (β) Το δοχείο γύρω από το φύλλο, το απομονώνει από το ρεύμα αέρα αλλά επιτρέπει την είσοδο της ακτινοβολίας (R_n), έτσι ώστε η αισθητή θερμότητα (H) και η λανθάνουσα (λE) συνεχώς να προστίθενται στον περιβάλλοντα από το δοχείο χώρο. Η διαπνοή τότε είναι ίση με $E_{l,eq}$ και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα είναι $D_{l,eq}$.

Οι δυο παραπάνω καταστάσεις που περιγράφηκαν είναι οριακές. Στην πραγματικότητα ο βαθμός σύνδεσης του φύλλου με τον περιβάλλοντα αέρα μπορεί να εκφραστεί ποσοτικά κατά μια κλίμακα μεταξύ των δυο αυτών ακραίων καταστάσεων. Προκειμένου να ορίσουμε την κλίμακα αυτή θα πρέπει πρώτα να μελετήσουμε τη διαπνοή στο επίπεδο του φύλλου.

2.1.2 Διαπνοή στο επίπεδο του φύλλου

Το ποσοστό της διαπνοής (E_l), για ένα συμμετρικό φύλλο που διαθέτει στόματα και στις δυο επιφάνειες, δίδεται από τον τύπο (Jarvis, 1985) :

$$\lambda E_l = \frac{2\rho C_p g_s VPD_l}{\gamma} \quad (2.1)$$

Το έλλειμμα κορεσμού στην επιφάνεια του φύλλου εξαρτάται από τη διαφορά της πίεσης ατμών στον κορεσμό στην επιφάνεια του φύλλου με την πίεση ατμών του αέρα, από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, τη ροή θερμότητας και υδρατμών στην επιφάνεια του φύλλου και από την ταχύτητα του ρεύματος του αέρα κοντά στην επιφάνεια του φύλλου.

Εάν η ταχύτητα του αέρα είναι αρκετά μεγάλη, τότε το έλλειμμα κορεσμού στην επιφάνεια του φύλλου τείνει να είναι ίδιο με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα και τότε η αγωγιμότητα είναι μεγάλη (συζευγμένο φύλλο). Έτσι η εξίσωση 2.1 μετασχηματίζεται σε :

$$\lambda E_1 = \frac{2g_s VPD_a}{P} = E_{1,imp} \quad (2.2)$$

όπου $E_{1,imp}$ είναι η διαπνοή η οποία οφείλεται σε παράγοντες μεταφοράς.

Από την άλλη πλευρά, όταν η ταχύτητα του αέρα είναι αρκετά μικρή πάνω από την επιφάνεια του φύλλου, τότε το VPD_1 διαφέρει σημαντικά από το VPD_a και εξαρτάται κυρίως από τη ροή θερμότητας και υδρατμών στην επιφάνεια του φύλλου. Στην περίπτωση αυτή το φύλλο είναι πλήρως μη συζευγμένο (η αγωγιμότητα τείνει στο μηδέν) με την ατμόσφαιρα (εικόνα 8β), το VPD_1 τροποποιείται και η τιμή της διαπνοής προσαρμόζεται προς μια κατάσταση «ισορροπίας» και η διαπνοή ελέγχεται αποκλειστικά από τη ροή καθαρής ακτινοβολίας R_n και δίδεται από την εξίσωση :

$$\lambda E = \frac{(R_n \Delta / \gamma)}{(\Delta / \gamma) + 1} = E_{1,eq} \quad (2.3)$$

2.1.3 Σύνδεση φύλλου με το περιβάλλον-Παράγοντας “Ω”

Οι McNaughton και Jarvis (1986) μετασχημάτισαν την εξίσωση των Penman-Monteith ως εξής :

$$E_1 = \Omega_1 E_{1,eq} + (1 - \Omega_1) E_{1,imp} \quad (2.4)$$

η οποία εμπεριέχει τον παράγοντα σύζευξης “Ω” και δίνει τη διαπνοή συναρτήσει δυο συνιστωσών (οριακές καταστάσεις) της διαπνοής : την $E_{l,eq}$, διαπνοή «εξισορρόπησης» που εξαρτάται κυρίως από την ακτινοβολία και την $E_{l,imp}$, «επιβαλλόμενη» διαπνοή που εξαρτάται κυρίως από τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον του φύλλου.

Ο παράγοντας “Ω” δίδεται από τη σχέση (McNaughton και Jarvis, 1986) :

$$\Omega_1 = \frac{\Delta/\gamma + 1}{\Delta/\gamma + 1 + g_a/g_s} \quad (2.5)$$

Ο παράγοντας “Ω” είναι αδιάστατος και παίρνει τιμές που κυμαίνονται σε ένα εύρος από 0 έως 1 ($0 < \Omega_1 < 1$).

Όταν το φύλλο δεν είναι συζευγμένο με την ατμόσφαιρα και η αεροδυναμική αγωγιμότητα (g_a) είναι μικρή τότε ο Ω_1 τείνει στο 1 και η διαπνοή στο σημείο «εξισορρόπησης», όταν όμως η g_a είναι πολύ μεγάλη και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (VPD_a) «επιβάλλεται» στο έλλειμμα κορεσμού του φύλλου (VPD_l), τότε ο Ω_1 τείνει στο 0 (μηδέν) και η διαπνοή στην τιμή της «εξαναγκασμένης» διαπνοής. Με άλλα λόγια μπορούμε να πούμε ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο Ω_1 (τείνει στο 1) τόσο χαμηλότερη είναι η σχετική σημασία της ταχύτητας του ανέμου, του VPD_a και της στοματικής αγωγιμότητας (g_s) στον έλεγχο της διαπνοής και στην περίπτωση αυτή η διαπνοή καθορίζεται κυρίως από τη διαθεσιμότητα της καθαρής ακτινοβολίας.

Από την εξίσωση 2.4 προκύπτει το γεγονός ότι η επίδραση της g_s στη διαπνοή, εξαρτάται από την τιμή του Ω_1 . Για συγκεκριμένες τιμές R_n , VPD_a , T οι McNaughton και Jarvis (1985) έδειξαν ότι η επίδραση στη διαπνοή μιας μικρής μεταβολής της στοματικής αγωγιμότητας δίδεται από την εξίσωση :

$$\frac{dE_l}{E_l} = (1 - \Omega_1) \frac{dg_s}{g_s} \quad (2.6)$$

Όταν η αεροδυναμική αγωγιμότητα είναι μικρή συγκρινόμενη με την στοματική, όπως συμβαίνει για μεγάλου μεγέθους, όχι καλά αεριζόμενα φύλλα, τότε ο Ω_1 τείνει στο 1 με αποτέλεσμα η διαπνοή να μην επηρεάζεται από αλλαγές της στοματικής αγωγιμότητας.

Από την άλλη πλευρά όταν η αγωγιμότητα επιφανειακού στρώματος είναι μεγάλη σε σχέση με τη στοματική όπως συμβαίνει σε μικρά καλά αεριζόμενα φύλλα, τότε ο Ω_1 τείνει στο μηδέν και η διαπνοή είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγές της στοματικής αγωγιμότητας.

Γι' αυτό το λόγο, ο βαθμός στον οποίο η διαπνοή ενός φύλλου ελέγχεται από την αεροδυναμική αγωγιμότητα, εξαρτάται από το πόσο καλά το έλλειμμα κορεσμού του φύλλου είναι συζευγμένο με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Η σχέση αυτή σύζευξης, εξαρτάται τόσο από την αεροδυναμική όσο και από τη στοματική αγωγιμότητα (εξίσωση 2.5). Για φύλλα συγκεκριμένου μεγέθους η αεροδυναμική αγωγιμότητα εξαρτάται από το πόσο καλά αεριζόμενα είναι (Jarvis, 1985), γεγονός που με τη σειρά του εξαρτάται από το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται τα φύλλα (ελεγχόμενες συνθήκες ή σε συνθήκες αγρού).

2.1.4 Διαπνοή στο επίπεδο της καλλιέργειας

Μπορούμε να υπολογίσουμε τη διαπνοή στο επίπεδο της καλλιέργειας με παρόμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση του φύλλου, εάν είμαστε σε θέση να ορίσουμε την αγωγιμότητα της καλλιέργειας, το έλλειμμα κορεσμού στην επιφάνεια της και ένα σημείο αναφοράς πάνω από αυτήν, όπου η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα είναι ανεξάρτητες από τη ροή θερμότητας και υδρατμών από την καλλιέργεια. Η διαδικασία όμως προσδιορισμού της αγωγιμότητας της καλλιέργειας (g_c) είναι αρκετά πολύπλοκη εξαιτίας της διακύμανσης της τιμής της στοματικής αγωγιμότητας των φύλλων των επιμέρους φυτών. Επιπροσθέτως η διακύμανση του ελλείμματος κορεσμού της καλλιέργειας είναι ένα ακόμα πρόβλημα στον προσδιορισμό μιας τιμής ελλείμματος κορεσμού ανάλογη με το VPD_1 στο επίπεδο του φύλλου.

Τα προβλήματα αυτά μπορούν να ξεπεραστούν εν μέρει, χρησιμοποιώντας τη θεωρία του «μεγάλου φύλλου» («big leaf») όπως πρότειναν οι Penman –Monteith (1981). Η προσέγγιση αυτή στηρίζεται στην υπόθεση ότι το προφίλ του αέρα που κυκλοφορεί εντός της καλλιέργειας και σε μικρό ύψος από αυτήν, είναι πλήρως ομοιόμορφο ενώ οι ανταλλαγές ενέργειας μεταξύ των φυτών της καλλιέργειας αγνοούνται. Η προσέγγιση αυτή, παρά τις αντιρρήσεις που κατά καιρούς έχουν

εκφραστεί (Martin, P., 1989), τυγχάνει ευρύτερης αποδοχής λόγω της απλότητας και της αποδοτικότητάς της.

Βασιζόμενοι στην προσέγγιση αυτή οι McNaughton και Jarvis (1986) υπολόγισαν τη διαπνοή της καλλιέργειας σε σχέση με τον παράγοντα “Ω” αντίστοιχα ως εξής :

$$E_c = \Omega_c E_{c,eq} + (1-\Omega)E_{c,imp} \quad (2.7)$$

όπου η διαπνοή «εξισορρόπησης» είναι αντίστοιχα :

$$\lambda E_{c,eq} = \frac{\Delta/\gamma(R_n - G)}{\Delta/\gamma + 1} \quad (2.8)$$

όπου G είναι η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος από το έδαφος στο φύλλο (Wm^{-2}) και η «επιβαλλόμενη» :

$$\lambda E_{c,imp} = \frac{g_c VPD_m}{P} \quad (2.9)$$

το VPD_m είναι το έλλειμμα κορεσμού του αέρα.

Ο παράγοντας “Ω” της καλλιέργειας δίδεται από την εξίσωση :

$$\Omega_c = \frac{\Delta/\gamma + 1}{\Delta/\gamma + 1 + g_{c,a}/g_c} \quad (2.10)$$

ενώ η μεταβολή της διαπνοής λόγω αλλαγής της αγωγιμότητας της καλλιέργειας (g_c) υπολογίζεται ως εξής :

$$\frac{dE_c}{E_c} = (1 - \Omega_c) \frac{dg_c}{g_c} \quad (2.11)$$

Είναι φανερό από τις παραπάνω εξισώσεις ότι η $\lambda E_{c,eq}$ είναι ανεξάρτητη από την καλλιέργεια ενώ η $\lambda E_{c,imp}$ είναι συνάρτηση της αγωγιμότητάς της (g_c). Επομένως ο

παράγοντας Ω_c ορίζει την έκταση στην οποία οι φυσιολογικές λειτουργίες (διαπνοή) και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά (στοματική αγωγιμότητα) της καλλιέργειας ελέγχουν τη διαπνοή.

2.1.5 Έλεγχος των στομάτων σε συνθήκες θερμοκηπίου

Τα θερμοκήπια, λόγω της ειδικής κατασκευής τους, συχνά δεν επιτρέπουν τον καλό αερισμό του εσωτερικού τους με αποτέλεσμα η κίνηση του αέρα μέσα σε αυτά να είναι μικρότερη απ' ό,τι σε συνθήκες αγρού και η εναλλαγή των αερίων με το εξωτερικό ρεύμα του αέρα είναι περιορισμένη. Για το λόγο αυτό η αεροδυναμική αγωγιμότητα ($g_{c,a}$) σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες αναμένεται να είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που παρατηρείται σε παρόμοιες καλλιέργειες σε συνθήκες αγρού.

Στην βιβλιογραφία δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα τα οποία να στοιχειοθετούν εκτιμήσεις είτε του Ω_i είτε του Ω_c (Jarvis, 1985). Πάντως εκτιμήσεις μεγάλης συγκέντρωσης CO_2 και πίεσης υδρατμών εντός του χώρου του θερμοκηπίου, αποτελούν ένδειξη ότι οι τιμές Ω_i και Ω_c πιθανόν να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες σε συνθήκες αγρού. Συνεπώς τα στόματα δεν έχουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της διαπνοής σε συνθήκες θερμοκηπίου, παρά μόνο όταν το VPD_a είναι πολύ μεγάλο (>2 kPa).

2.2 Δείκτης υδατικής κατάστασης της Καλλιέργειας (CWSI)

2.2.1 Γενικά

Ένας τρόπος εκτίμησης της υδατικής κατάστασης των φυτών μιας καλλιέργειας και κατά συνέπεια της εκτίμησης των αναγκών σε νερό, είναι ο υπολογισμός του δείκτη υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας (CWSI). Ο δείκτης αυτός όπως προτάθηκε από τον Jackson et.al (1981), είναι ένα πολύτιμο εργαλείο προκειμένου να καταστρώσουμε

προγράμματα αρδεύσεων. Το κυριότερο πλεονέκτημά του σε σχέση με άλλες μεθόδους (SterssDegreeDay –Idso et al., 1977 και Jackson et al., 1977 , TemperatureStressDay – Gardner et al., 1981), είναι το γεγονός ότι κατά τον υπολογισμό του λαμβάνεται υπ’ όψη η επίδραση των παραμέτρων του περιβάλλοντος, στην υδατική κατάσταση των φυτών. Οι παράμετροι αυτοί είναι : η καθαρή ακτινοβολία στο επίπεδο του φύλλου (R_n), η θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα (T_a) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (VPD_a).

2.2.2 Ισοζύγιο Ενέργειας –Χρήση των διαφορών θερμοκρασίας καλλιέργειας- αέρα στον προσδιορισμό του CWSI.

Οι Idso et al., (1977) και οι Jackson et al., (1977) χρησιμοποίησαν τη διαφορά $T_c - T_a$ σαν ένα δείκτη της υδατικής κατάστασης των φυτών. Ονόμασαν τη διαφορά αυτή SDD (Stress Degree Day) και τη συσχέτισαν με την παραγωγικότητα και τις ανάγκες σε νερό της καλλιέργειας. Θεώρησαν ότι οι μεταβλητές που περιγράφουν το μικροκλίμα (VPD_a , R_n , WS) μπορούσαν να περιγραφούν από τη διαφορά αυτή, γεγονός το οποίο υπό ορισμένες συνθήκες ισχύει ενώ σε άλλες όχι. Οι Idso et al., (1981) υπολογίζοντας τη διαφορά $T_c - T_a$ και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (VPD_a), για διάφορες καλλιέργειες, έδειξαν ότι μεταξύ τους, σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχει γραμμική σχέση. Από τα πειραματικά δεδομένα, με γραμμική παλινδρόμηση όρισαν μια ευθεία γραμμή ως κατώτατο όριο, στο οποίο τα φυτά βρίσκονταν σε άριστη υδατική κατάσταση ($g_c \rightarrow \infty$) και αντιστοίχως μια άλλη ως ανώτατο όριο, στο οποίο τα φυτά βρίσκονταν σε κατάσταση μη διαπνοής ($g_c \rightarrow 0$). Με τον τρόπο αυτό όρισαν ένα δείκτη υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας (CWSI).

Από τις εξισώσεις 1.1, 1.4, 1.5 και θεωρώντας ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στα φύλλα για τη φωτοσύνθεση P_s είναι αμελητέα, έχουμε :

$$T_c - T_a = \frac{R_n \gamma^*}{\rho C_p (\Delta + \gamma^*)} - \frac{VPD_a}{\Delta + \gamma^*} \quad (2.12)$$

Η σχέση 2.12 δίνει τη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας –αέρα, συναρτήσεως του ελλείμματος κορεσμού του αέρα (VPD_a), της καθαρής ακτινοβολίας στο επίπεδο της

καλλιέργειας (R_n), της αεροδυναμικής αγωγιμότητας $g_{c,a}$ και της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας (g_c).

Όρια της διαφοράς $T_c - T_a$:

Το ανώτατο όριο της διαφοράς $T_c - T_a$ βρίσκεται από την εξίσωση 2.12 θεωρώντας ότι η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας τείνει στο μηδέν ($g_c \rightarrow 0$), κατάσταση η οποία περιγράφει μια καλλιέργεια με μηδενική διαπνοή. Έτσι προκύπτει η σχέση:

$$T_c - T_a = \frac{R_n g_{c,a}}{\rho C_p} \quad (2.13\alpha)$$

όπου T_c πλέον είναι η μέγιστη θερμοκρασία της καλλιέργειας T_{Max} για θερμοκρασία αέρα T_a , δηλαδή :

$$T_{Max} = T_a + \frac{R_n g_{c,a}}{\rho C_p} \quad (2.13\beta)$$

Το κατώτατο όριο, βρίσκεται επίσης από την εξίσωση 2.12, θεωρώντας ότι η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας τείνει στο άπειρο ($g_c \rightarrow \infty$), περίπτωση στην οποία το φυτό βρίσκεται σε άριστη υδατική κατάσταση :

$$T_c - T_a = \frac{R_n \gamma}{\rho C_p (\Delta + \gamma)} - \frac{VPD_a}{\Delta + \gamma} \quad (2.14)$$

Από την εξίσωση 2.12 μπορούμε να προσδιορίσουμε την ελάχιστη θερμοκρασία της καλλιέργειας (T_{min}), η οποία επιτυγχάνεται όταν η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας είναι μέγιστη (g_{Max} , σε $mm\ s^{-1}$), έτσι έχουμε :

$$T_{min} = T_a + \frac{\frac{(1/g_{c,a} + 1/g_{Max})R_n}{\rho C_p} - \frac{VPD_a}{\Delta + \gamma}}{1 + \Delta/\gamma + g_{c,a}/g_{Max}} \quad (2.15)$$

Έτσι ο δείκτης υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας μπορεί να εκφραστεί ως εξής (Jackson et al., 1981) :

$$CWSI = \frac{T_c - T_{min}}{T_{Max} - T_{min}} \quad (2.16)$$

και λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Όταν ο δείκτης παίρνει τιμές κοντά στο μηδέν τότε αυτό σημαίνει ότι η καλλιέργεια βρίσκεται σε πολύ καλή υδατική κατάσταση και ότι η ποσότητα νερού που δέχονται τα φυτά με την άρδευση, καλύπτει τις απώλειες μέσω εξατμισοδιαπνοής. Αντίθετα όταν παίρνει τιμές κοντά στη μονάδα τότε τα φυτά βρίσκονται σε συνθήκες έντονου στρες.

2.2.3 Σφάλματα κατά την εκτίμηση του δείκτη υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας

Λόγω διαφόρων παραγόντων του περιβάλλοντος και των διαφορετικών μεθόδων που ακολουθούνται στον υπολογισμό των θερμοκρασιών (T_c , T_{min}), είναι δυνατόν να συμβούν λάθη κατά την εκτίμηση του δείκτη CWSI.

Ο άνεμος είναι μια από τις παραμέτρους που μπορούν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες εκτιμήσεις του δείκτη, λόγω επίδρασης στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Οι Thom και Oliver (1977) συσχέτισαν την ταχύτητα του ανέμου με την αγωγιμότητα επιφανειακού στρώματος των φύλλων της καλλιέργειας και απέδειξαν ότι ο CWSI αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Επίσης όταν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων υπάρχει ανομοιόμορφη σκίαση στο θερμοκήπιο, λόγω του σκελετού του, είναι πολύ πιθανό να συμβούν σοβαρές αποκλίσεις στο δείκτη. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σκιαζόμενα μέρη της καλλιέργειας παρουσιάζουν διαφορετικές θερμοκρασίες από αυτά που βρίσκονται σε πλήρες φώς.

Λάθος εκτιμήσεις του δείκτη μπορούν να προκύψουν από λάθη στις μετρήσεις των θερμοκρασιών αέρα και καλλιέργειας.

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΠΝΟΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΜΑΤΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΠΟΡΟΜΕΤΡΟ

3.1 Γενικά

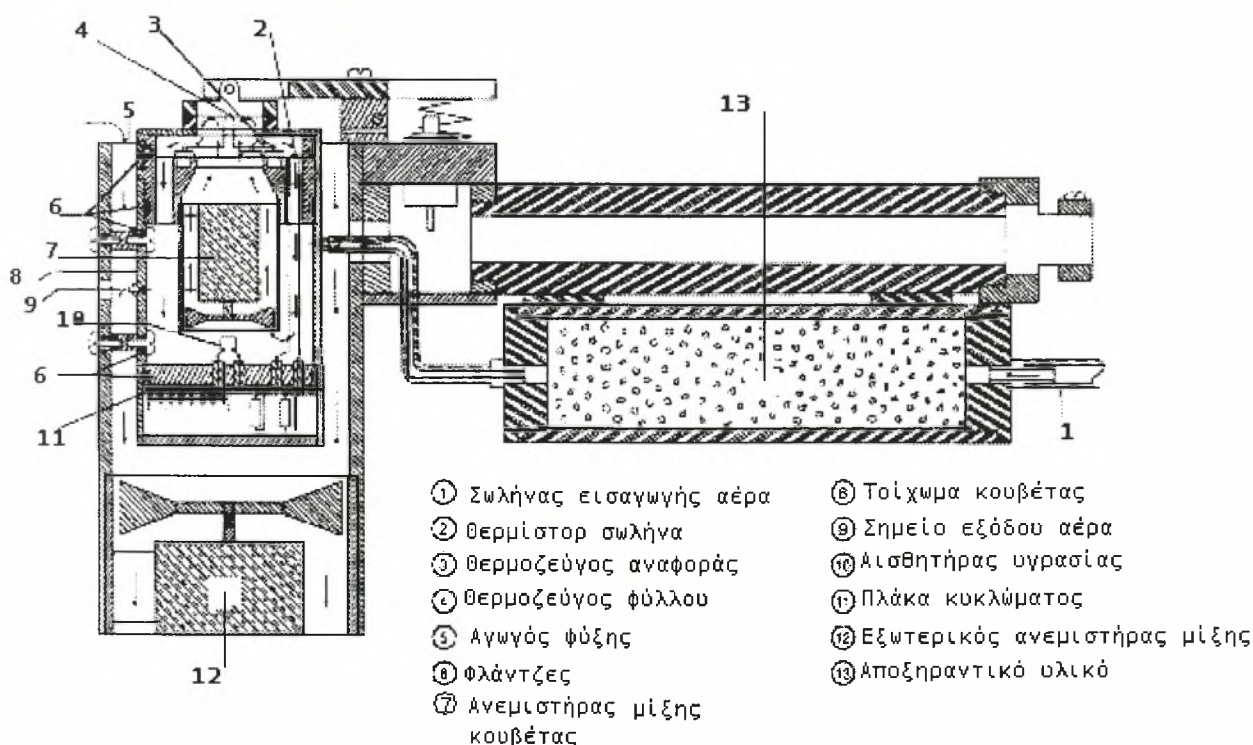
Τα πορόμετρα είναι όργανα με τη βοήθεια των οποίων είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με σχετική ακρίβεια η συμπεριφορά των στομάτων μιας καλλιέργειας. Η εκτίμηση αυτή γίνεται έμμεσα, με τον υπολογισμό της στοματικής αγωγιμότητας (ή αντίστασης) των φύλλων των φυτών της καλλιέργειας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πορομέτρων ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας πάνω στις οποίες στηρίζονται, παρ' όλα αυτά η βασική κοινή αρχή στην οποία στηρίζεται η χρήση τους είναι η δυνατότητα μέτρησης της εναλλαγής αερίων μεταξύ των φύλλων και του αέρα. Αν και η ανάπτυξη τέτοιων οργάνων έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας τα τελευταία 30 χρόνια, με αποτέλεσμα νέοι περισσότεροι τεχνολογικά προηγμένοι τύποι να διατίθενται στο εμπόριο, εν τούτοις στη διεθνή βιβλιογραφία απαντώνται συχνά διαφωνίες ως προς την αποτελεσματικότητα – ακρίβεια των μετρήσεων (Idso et.al., 1986, Idso et.al., 1987, Verhoef, 1997). Παρ' όλα αυτά λόγω της ευκολίας στο χειρισμό και σχετικής ακρίβειας (όπως δείχνουν πρόσφατες μελέτες) χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην έρευνα. Στη συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση του τύπου του πορομέτρου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

3.2 Παρουσίαση λειτουργίας του Πορομέτρου LI –1600M

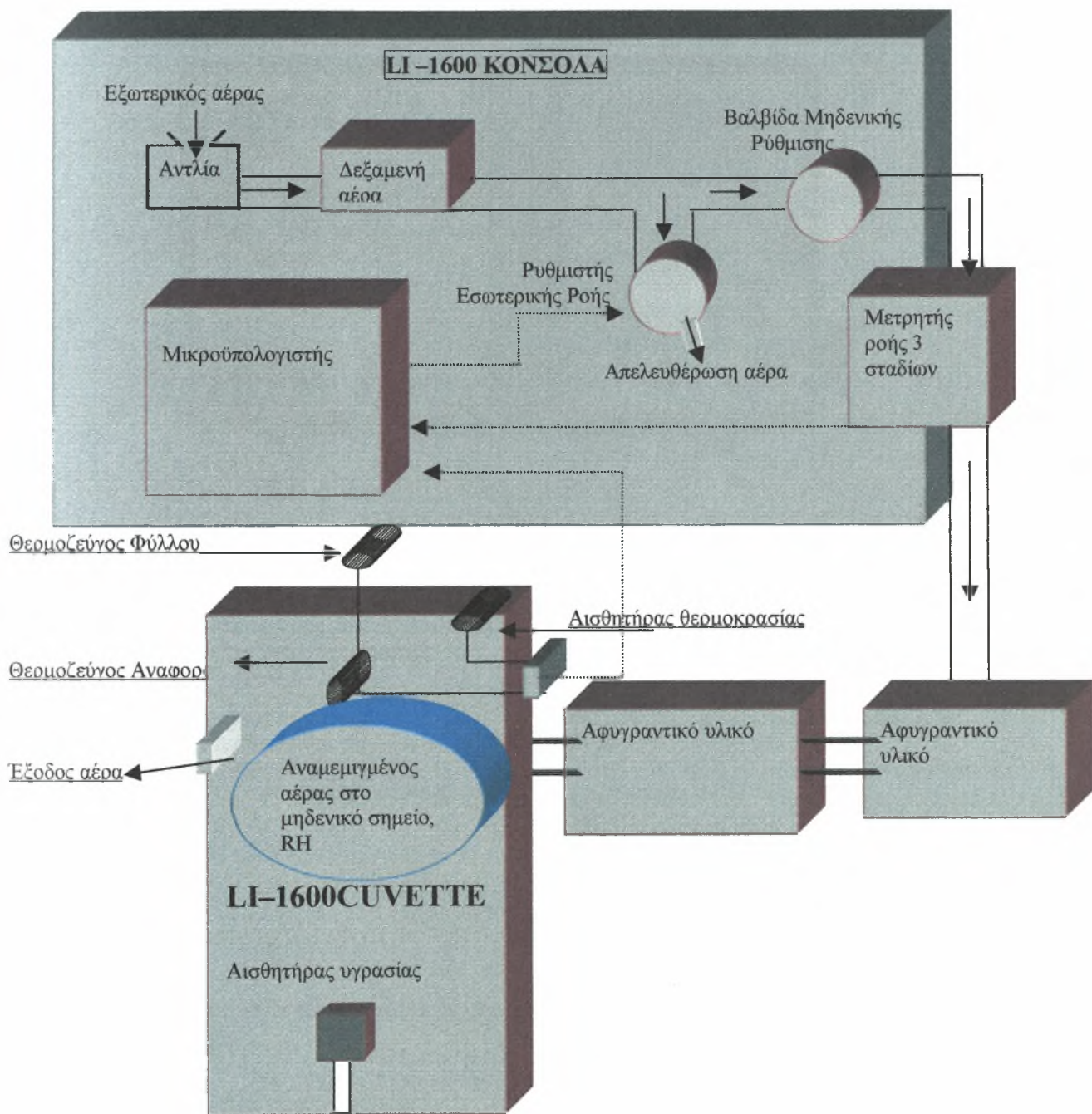
3.2.1 Παρουσίαση –Περιγραφή

Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι πορομέτρων τα σταθερής και τα δυναμικής κατάστασης. Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής χρησιμοποιήθηκε πορόμετρο σταθερής κατάστασης (LI –1600M, LICOR Inc., Lincoln, NE, USA), του οποίου ακολουθεί λεπτομερή περιγραφή. Το πορόμετρο (LI–1600M) αποτελείται από 2 κύρια εξαρτήματα, την κεντρική μονάδα ενδείξεων και ελέγχου (εικόνες 6, 7) και την κεφαλή

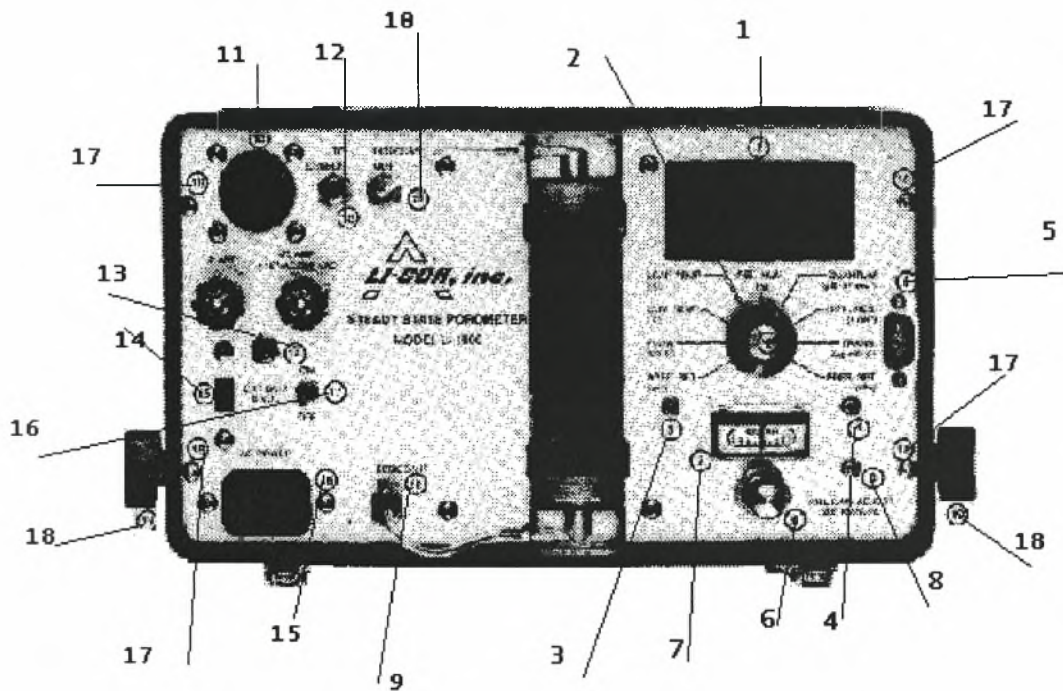
του αισθητήρα με το θάλαμο μέτρησης (εικόνες 5, 6). Η κεντρική μονάδα του LI-1600M περιλαμβάνει, την αντλία αέρα με το ρυθμιστή ροής και το μετρητή ροής, ένα σωλήνα με αποξηραντικό υλικό και ηλεκτρονικά συστήματα ενδείξεων. Στο τμήμα του οργάνου που βρίσκεται ο θάλαμος μέτρησης υπάρχουν ένας δεύτερος σωλήνας αποξηραντικού υλικού, ένας ανεμιστήρας μίξης, ένας αισθητήρας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και υγρασίας αέρα, ένας αισθητήρας για τη μέτρηση της θερμοκρασίας φύλλου και ένας αισθητήρας μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην εικόνα 6 παρουσιάζονται οι λειτουργίες της βασικής μονάδας και ένα λεπτομερειακό διάγραμμα της κεφαλής του αισθητήρα. Το συγκεκριμένο μοντέλο υπολογίζει την ολική αγωγιμότητα του φύλλου σε μοριακές μονάδες ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) και στα αποτελέσματα δεν λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση από την αεροδυναμική αγωγιμότητα.



Εικόνα 6. Διάγραμμα της κεφαλής του αισθητήρα



Εικόνα 7. Γενικό διάγραμμα του συστήματος του Πορομέτρου LI-1600M



- | | |
|--|--|
| 1) Θόνη | 10) Εξαγωγή(αέρα) απο το Αποξηραντικό Υλικό |
| 2) Διακόπτης λειτουργίας Ενδείξεων-Ελέγχου | 11) Σύνδεση καλωδίου της κεφαλής του αισθητήρα |
| 3) Δυναμόμετρο Ρύθμισης Ανοίγματος | 12) Σύνδεση του καλωδίου της κεφαλής του αισθητήρα |
| 4) Δυναμόμετρο Ρύθμισης Πίεσης | 13) Ρευματοδότης εξωτερικής μπαταρίας |
| 5) Σύνδεση για τη συλλογή δεδομένων | 14) Διακόπτης επιλογής τάσης |
| 6) Βαλβίδα Μηδενικής Ρύθμισης | 15) Ρευματολήπτης εναλλασσόμενου ρεύματος |
| 7) Δείκτης Μηδενικής Ρύθμισης | 16) Διακόπτης ON-OFF |
| 8) Δυναμόμετρο Μηδενικής Ρύθμισης | 17) Βίδες |
| 9) Εισαγωγή(αέρα) στο Αποξηραντικό Υλικό | 18) Συνδέσεις ζώνης για μεταφορά |

Εικόνα 8. Παρουσίαση της κεντρικής μονάδας ελέγχου και των ενδείξεων αυτής

Το πορόμετρο LI -1600M λειτουργεί πάνω σε μια αρχή μηδενικής ισορροπίας. Ένα διαπνέον φύλλο συσφίγγεται πάνω στο θάλαμο μέτρησης προκαλώντας την αύξηση της σχετικής υγρασίας του θαλάμου. Ο ρυθμιστής ροής αυξάνει το ρυθμό ροής ξηρού αέρα μέσα στο θάλαμο προκειμένου να εξισορροπηθεί η απώλεια νερού

με τη διαπνοή από το φύλλο –δείγμα, μέχρι η σχετική υγρασία του θαλάμου να επιστρέψει στο σημείο αναφοράς που έχει καθοριστεί από το χρήστη, το οποίο συνήθως είναι κοντά στη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος.

Η απώλεια νερού από ένα φύλλο που τοποθετείται στο θάλαμο, καθορίζεται από τη μέτρηση του ρυθμού ροής ξηρού αέρα που είναι απαραίτητος για να διατηρηθεί μια σταθερή υγρασία μέσα στο θάλαμο. Τυπικά, η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος χρησιμοποιείται ως μηδενικό σημείο και ο ξηρός αέρας εισάγεται μέσα στο θάλαμο με ένα ρυθμό που είναι αρκετός για να ισορροπήσει η απώλεια νερού που φεύγει από το φύλλο διαμέσου διαπνοής. Αυτό διατηρεί τη σχετική υγρασία του θαλάμου στο σημείο αναφοράς.

Η ροή και τα στοιχεία ελέγχου που το εκπληρώνουν φαίνονται στην εικόνα 5. Η αντλία τραβά αέρα μέσα από την κονσόλα και τον αποστέλνει διαμέσου μιας αντίστασης ρύθμισης αέρα, προκειμένου να αποφευχθούν διακυμάνσεις. Ο αέρας στη συνέχεια κινείται διαμέσου της διακλάδωσης του ρυθμιστή αέρα, όπου ένα μέρος του αέρα εξάγεται διαμέσου του Ρυθμιστή Εσωτερικής Ροής. Το ρεύμα αέρος που απομένει διέρχεται από τη Βαλβίδα Μηδενικής Ρύθμισης, ένα μετρητή ροής τριών σταδίων και δυο στήλες αποξηραντικού υλικού. Ο αφυδατωμένος πλέον αέρας εισέρχεται στο θάλαμο της κεφαλής του αισθητήρα όπου και αναμιγνύεται με την εισερχόμενη υγρασία του φύλλου και εξέρχεται από το θάλαμο διαμέσου μιας μικρής εξόδου.

Η αγωγιμότητα των στομάτων υπολογίζεται απ' ευθείας από τις μετρημένες τιμές της σχετικής υγρασίας, των θερμοκρασιών φύλλου και αέρος και του ρυθμού ροής. Η ένταση του φωτός μετράται επίσης ως ένας συσχετισμός, χωρίς όμως να χρησιμοποιείται περαιτέρω στους υπολογισμούς.

3.2.2 Υπολογισμός της Διαπνοής και Στοματικής Αγωγιμότητας

Με τη διαδικασία που αναφέρθηκε προηγουμένως, αρχικά υπολογίζεται η διαπνοή και στη συνέχεια εκτιμάται η αγωγιμότητα του φύλλου –δείγματος από τη σχέση (Cowan, 1977) :

$$E_m = \frac{g_{tm}(e_l - e_{cuv})}{P} \quad (3.1)$$

όπου E_m είναι η διαπνοή σε $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ και g_{tm} είναι η ολική αγωγιμότητα του φύλλου στις ίδιες μονάδες, e είναι το υδατικό δυναμικό (σε kPa) στο φύλλο (l) και το θάλαμο (cuv) αντίστοιχα και P είναι η ατμοσφαιρική πίεση (kPa) στην τοποθεσία μέτρησης.

Το συγκεκριμένο μοντέλο πορομέτρου υπολογίζει τη ολική αγωγιμότητα του φύλλου χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση της αεροδυναμικής αγωγιμότητας. Για να επιτευχθεί η διόρθωση λαμβάνεται ως δεδομένο ότι οι τιμές των αντιστάσεων είναι προσθετές ενώ αυτές της αγωγιμότητας δεν είναι. Έτσι θεωρώντας $r_t = r_s + r_a$ και ότι η αγωγιμότητα είναι το αντίστροφο της αντίστασης βρίσκουμε τη στοματική αγωγιμότητα από τη σχέση :

$$g_s = \frac{g_a g_t}{g_a - g_t} \quad (3.2)$$

όπου g_a και g_t είναι η αεροδυναμική και η ολική αγωγιμότητα του φύλλου αντίστοιχα σε μονάδες $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Χρησιμοποιώντας το κάλυμμα των 2 m^2 το όργανο έχει μια σταθερή αεροδυναμική αντίσταση των 0.15 s cm^{-2} η οποία είναι ισοδύναμη με μια αεροδυναμική αγωγιμότητα των 6.7 cm s^{-1} ή $2.7 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Οπότε μετατρεπόμενη σε μοριακές μονάδες (LI-1600 Instruction manual, Revision 6, 1989) παίρνει τη μορφή :

$$g_s = \frac{2.7 g_t}{2.7 - g_t} \quad (3.3)$$

Υπάρχουν δυο τρόποι, όσο αναφορά τις μονάδες, έκφρασης της αγωγιμότητας (ή της αντίστασης). Στη μια περίπτωση η αγωγιμότητα εκφράζεται σε μονάδες ταχύτητας (ms^{-1}) και στην άλλη εκφράζεται σε μοριακές μονάδες ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Όταν χρησιμοποιούνται οι μοριακές μονάδες (m) πολλές φορές είναι αναγκαίο να μετατραπούν σε μονάδες ταχύτητας (v), προκειμένου να συγκριθούν με τιμές αγωγιμότητας από άλλες εργασίες παλαιότερης βιβλιογραφίας στις οποίες συνήθως

εκφράζεται σε μονάδες ταχύτητας. Επίσης πολλές φορές επιβάλλεται να γίνει η αντίθετη μετατροπή. Η σχέση που περιγράφει τη μετατροπή της αγωγιμότητας από τη μορφή στην άλλη είναι :

$$g_{tm} = \frac{g_{iv}P}{RT_1} \quad (3.4)$$

Στην περίπτωση που η μετατροπή γίνεται από μονάδες ταχύτητας σε μοριακές χρησιμοποιείται η μέση θερμοκρασία αέρα –φύλλου, δηλαδή :

$$g_{iv} = \frac{g_{tm}RT_{av}}{P} \quad (3.5)$$

όπου T_{av} είναι η μέση θερμοκρασία αέρα –φύλλου.

Όταν η αγωγιμότητα εκφράζεται σε μοριακές μονάδες, η τιμή της δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως η θερμοκρασία και η πίεση.

3.3 Πηγές λάθους στην εκτίμηση της Διαπνοής και της Στοματικής Αγωγιμότητας με χρήση πορομέτρου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, συχνά παρατηρούνται διαφωνίες και ενστάσεις όσο αναφορά την αξιοπιστία των μετρήσεων με χρήση της πορομετρίας. Πολλοί συγγραφείς (Verhoef, 1997, Idso et al., 1986, Idso et al., 1987) αναφέρουν πως τιμές της αγωγιμότητας που μετρήθηκε με τη μέθοδο της πορομετρίας διαφέρουν σημαντικά από αυτές που εκτιμώνται με άλλες μεθόδους. Οι διαφορές αυτές οφείλονται σε λάθος χειρισμούς κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ή μη κατάλληλη ρύθμιση των οργάνων πριν τις μετρήσεις, παρά με την αξιοπιστία αυτών (Monteith, 1990, McDermitt, 1990).

Παρά το γεγονός ότι η πορομετρία μπορεί να δώσει σχετικά ακριβείς μετρήσεις κάτω από ποικίλες συνθήκες, ωστόσο υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση της. Συγκεκριμένα σε υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας (> 80 %) είναι πολύ δύσκολο να

πραγματοποιηθούν μετρήσεις της σχετικής υγρασίας με μεγάλης ακρίβειας αισθητήρες. Λάθος στη μέτρηση της υγρασίας οδηγούν σε λάθος εκτίμηση της αγωγιμότητας.

Πολλές φορές παρατηρείται απότομο κλείσιμο των στομάτων όταν τα φύλλα τοποθετούνται στο θάλαμο του πορομέτρου. Η αντίδραση αυτή πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι η σταθερότητα της αγωγιμότητας του φύλλου μέσα στο θάλαμο του πορομέτρου επηρεάζεται από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, την υδατική κατάσταση του φυτού, την ένταση του φωτός καθώς και το είδος του φυτού. Επομένως το κλείσιμο των στομάτων μπορεί να αποτελεί πρόβλημα σε μια περίπτωση και όχι σε άλλη. Όταν το φύλλο παραμένει για μεγάλο χρονικό διάστημα στο θάλαμο μέτρησης, τότε παρατηρείται μείωση της αγωγιμότητας, με αποτέλεσμα να υπάρχουν σοβαρά λάθη στην εκτίμησή της. Ένας τρόπος να αποφευχθεί η κατάσταση αυτή, είναι η μέτρηση να γίνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα (60 sec ή λιγότερο).

Όπως γίνεται φανερό από την περιγραφή της λειτουργίας του πορομέτρου, είναι απαραίτητη η εισαγωγή μέσα στο θάλαμο ξηρού αέρα ($\leq 2\%$ RH). Η συνθήκη αυτή εξασφαλίζεται με τη χρήση αφυγραντικών υλικών (π.χ. Silica gel), τα οποία έχουν την ιδιότητα να απορροφούν την υγρασία του εισερχόμενου ρεύματος αέρα. Τα υλικά αυτά λόγω της ολοένα και μεγαλύτερης απορρόφησης υγρασίας κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, προοδευτικά καθίστανται κορεσμένα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν σωστές εκτιμήσεις της σχετικής υγρασίας. Αυτό οδηγεί σε λάθος μετρήσεις της αγωγιμότητας, αφού ακόμα και μια διαφορά κατά 2 % της RH από πραγματικές τιμές, μπορεί να προκαλέσει μεγάλα σφάλματα. Έτσι είναι επιβεβλημένη η αφυδάτωση των υλικών αυτών μετά από κάθε χρήση του οργάνου.

Μια άλλη πηγή λάθους είναι η εσφαλμένη μέτρηση των επιμέρους θερμοκρασιών του φύλλου και του αέρα. Από παρατηρήσεις προκύπτει ότι ένα μικρό σφάλμα της τάξης του ± 0.5 °C στον υπολογισμό της διαφοράς των δυο θερμοκρασιών, μπορεί να προκαλέσει απόκλιση της εκτιμώμενης αγωγιμότητας κατά 25 –50 % (Verhoef, 1997). Η απόκλιση αυτή δε μπορεί να είναι μεγαλύτερη σε συνθήκες υψηλής RH.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

4.1 Περιγραφή θερμοκηπίου και καλλιέργειας

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν το καλοκαίρι (Ιούνιο-Ιούλιο) και το φθινόπωρο (Οκτώβριο) του 1999 σε γυάλινο θερμοκήπιο του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο αγρόκτημα του Βελεστίου. Το πλάτος του θερμοκηπίου είναι 6.5 m και το μήκος του 31 m, το ύψος του ορθοστάτη είναι 2.9 m και το ύψος του κορφιά 4 m και καλύπτει συνολική επιφάνεια 200m².

Στο θερμοκήπιο υπήρχε εγκατεστημένη υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς (*Rosa hybrida* cv. First Red) σε σάκους περλίτη με πυκνότητα 6 φυτά/m². Η καλλιέργεια ήταν διαμορφωμένη με την τεχνική “ Shoot bending” σύμφωνα με την οποία οι βλαστοί οι οποίοι δεν θεωρείται ότι θα δώσουν ικανοποιητικής ποιότητας άνθη, κάμπτονται και αφήνονται πλάγια. Η τεχνική αυτή επιτρέπει να επιτευχθεί μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια διαθέσιμη για φωτοσύνθεση, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη συνεισφορά της καλλιέργειας στην ψύξη του θερμοκηπίου μέσω της διαπνοής. Έχει βρεθεί ότι οι πλάγιοι βλαστοί έχουν χαμηλότερη φωτοσυνθετική ικανότητα απ’ ότι οι ανθοφόροι βλαστοί (20 –60 % των ανθοφόρων) (Gutierrez, R.P., 2000). Η άρδευση και η λίπανση γινόταν κάθε ώρα από τις 6:00 έως 21:00 με σύστημα στάγδην το οποίο ελεγχόταν από ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Η αγωγιμότητα και η διαπνοή των φύλλων μετρήθηκε με πορόμετρο σταθερής κατάστασης (LI-1600M, LICOR Inc., Lincoln, NE, USA). Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων έγινε επιλογή διαφόρων φύλλων μέσα στην καλλιέργεια σε σχέση με την ηλικία και τη θέση τους πάνω στο φυτό (φύλλα ανθοφόρων ή πλάγιων βλαστών). Οι κατηγορίες στις οποίες έγινε ο διαχωρισμός με βάση την ηλικία ήταν : (α) νεαρής ηλικίας φύλλα, μικρότερα των 15 ημερών, (β) ώριμα φύλλα, 15-30 ημερών, (γ) μέσης ηλικίας φύλλα 30-45 ημερών και (δ) υπερώριμα φύλλα, μεγαλύτερα των 45 ημερών. Στην εικόνα 9 παρουσιάζεται ένα τυπικό φυτό τριανταφυλλιάς διαμορφωμένο με την τεχνική “ Shoot bending”, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται οι κατηγορίες των φύλλων ανά ηλικία.



Εικόνα 9. Φυτό τριανταφυλλιάς διαμορφωμένο με την τεχνική "shoot bending"

Οι μετρήσεις γινόταν από τις πρώτες πρωινές ώρες (8:00) μέχρι αργά το απόγευμα (17:00) ανά χρονικά διαστήματα των 30 min. Στο διάστημα των 30 min γινόταν μέτρηση σε 20 φύλλα της ίδιας περίπου θέσης και ηλικίας και από τις μετρήσεις αυτές υπολογιζόταν ο μέσος όρος. Παράλληλα με τις μετρήσεις αγωγιμότητας και διαπνοής γινόταν μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας (R_s), θερμοκρασίας αέρα (T_a) και φύλλων (T_l) και σχετικής υγρασίας του αέρα (RH).

Στις εικόνες 10 και 11 παρουσιάζονται μια άποψη της καλλιέργειας και η χρήση του πορομέτρου κατά τη διαδικασία των μετρήσεων.



Εικόνα 10. Άποψη της υδροπονικής καλλιέργειας τριανταφυλλιάς



Εικόνα 11. Μέτρηση με πορόμετρο σε φύλλα ανθοφόρων βλαστών

Παράλληλα με τις πιο πάνω μετρήσεις έγιναν και μετρήσεις διαπνοής με τη χρήση λυσιμέτρου τοποθετημένου στο μέσο του θερμοκηπίου. Η συσκευή αποτελείτο από μια ηλεκτρονική ζυγαριά (δυναμικότητα = 62 Kg, ακρίβεια ζύγισης = ± 1 gr) εφοδιασμένη με δίσκο που περιείχε 6 φυτά, αναπτυσσόμενα σε ένα σάκο περλίτη και με ένα ανεξάρτητο σύστημα τροφοδοσίας και στράγγισης νερού. Γινόταν η παραδοχή ότι η απώλεια βάρους που καταγραφόταν από τη ζυγαριά ισοδυναμούσε με τη διαπνοή των φυτών για το ίδιο χρονικό διάστημα.



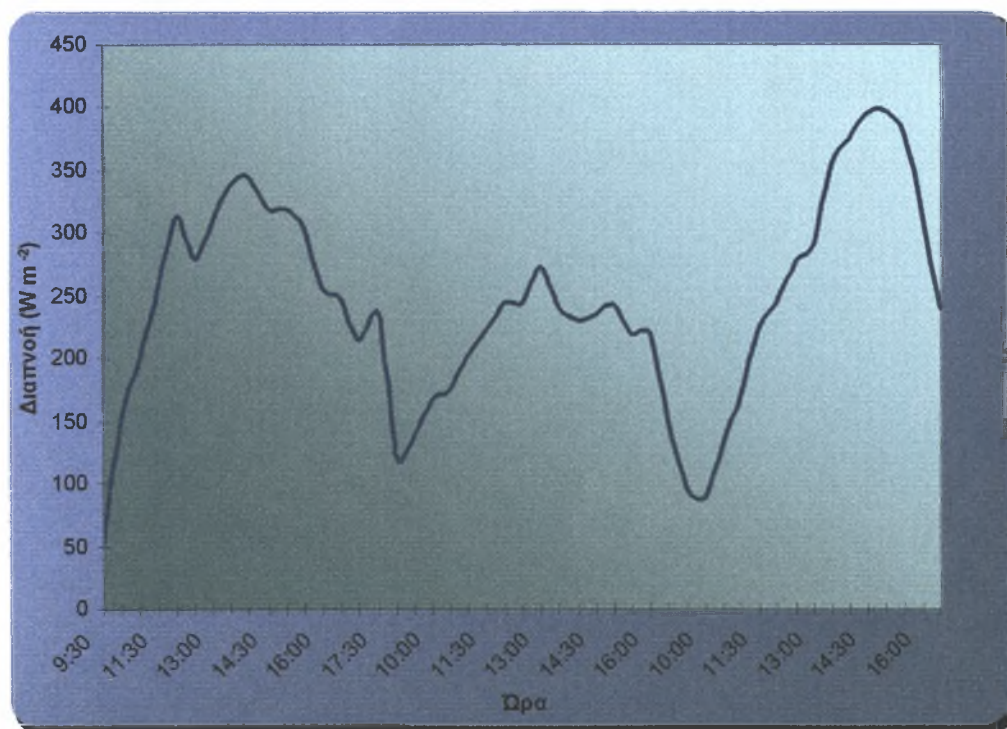
Εικόνα 12. Άποψη του λυσιμέτρου

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ -ΣΥΖΗΤΗΣΗ -ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

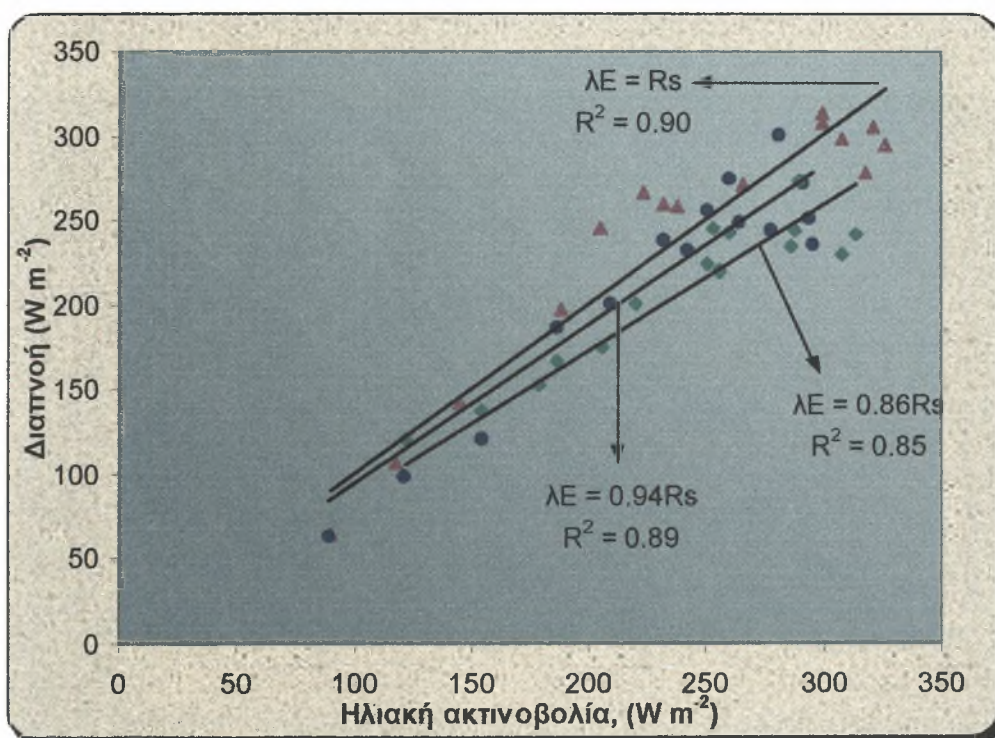
5.1 Διαπνοή

Η πορεία της διαπνοής κατά τη διάρκεια της ημέρας, παρουσιάζεται για διάφορες ημέρες στο Σχήμα 1. Παρατηρούμε ότι η διαπνοή ακολουθεί μια περίπου κωδωνοειδή καμπύλη, με τη μέγιστη τιμή της να εμφανίζεται κοντά στο ηλιακό μεσημέρι, περίπου στις 13:30.



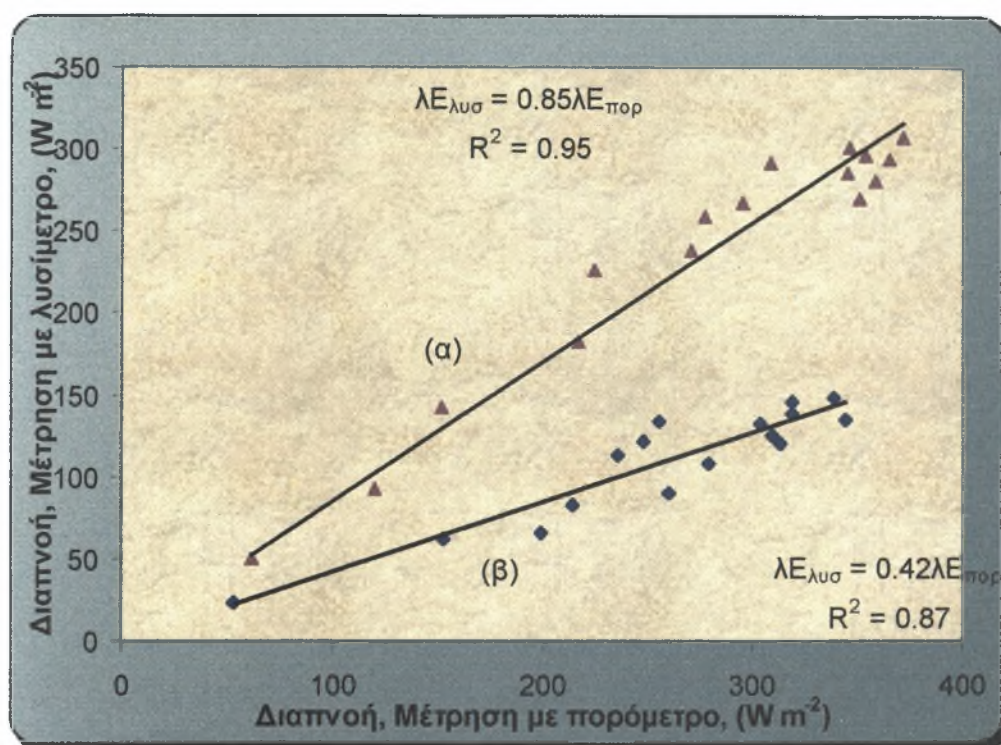
Σχήμα 1. Πορεία της διαπνοής κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η σχέση της διαπνοής με την ηλιακή ακτινοβολία για τρεις διαφορετικές ημέρες και για φύλλα παρόμοιας θέσης και ηλικίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Η σχέση αυτή είναι περίπου ίδια για τις ημέρες που παρουσιάζονται.



Σχήμα 2. Διαπνοή συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας.

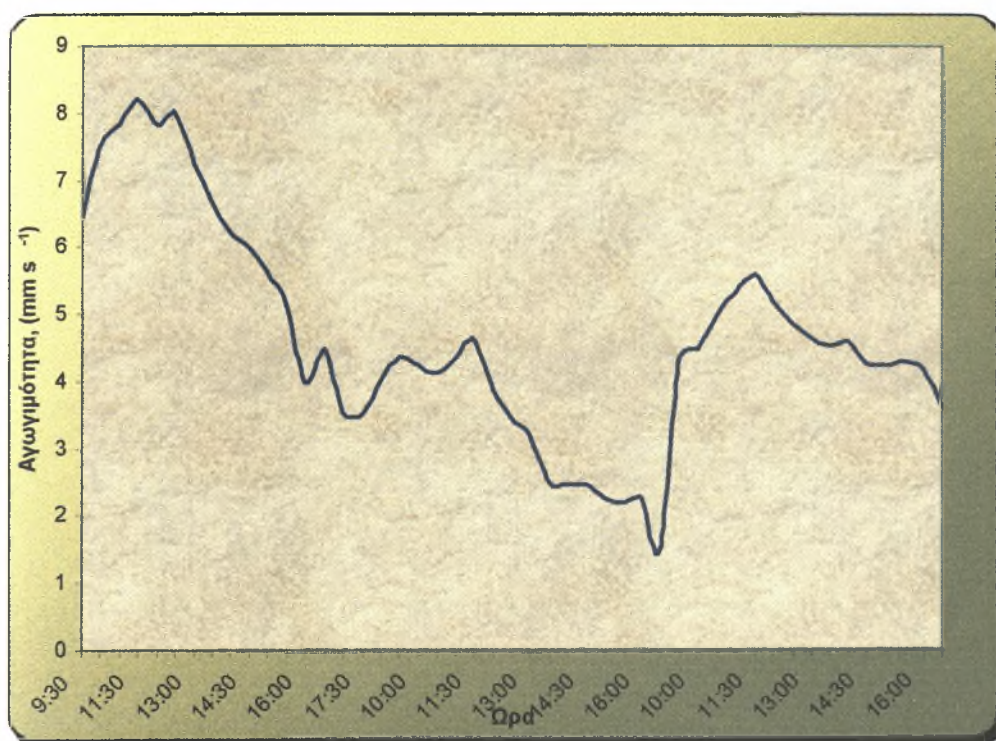
Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται σύγκριση μεταξύ μετρημένων τιμών της διαπνοής με πορόμετρο και το λυσίμετρο. Οι μετρήσεις με το πορόμετρο αφορούσαν δυο κατηγορίες φύλλων : (1) ώριμα φύλλα (ηλικίας 15 –30 ημερών) που βρίσκονταν σε ανθοφόρους βλαστούς και (2) μέσης ηλικίας φύλλα (30 –45 ημερών), τα οποία βρίσκονταν σε πλάγιους, λυγισμένους βλαστούς. Οι μετρήσεις με το λυσίμετρο πραγματοποιήθηκαν σε 6 φυτά στα οποία η κατανομή της φυλλικής επιφάνειας ήταν : 70–80 % περίπου σε πλάγιους βλαστούς και 20–30% περίπου σε ανθοφόρους.



Σχήμα 3. Σχέση της διαπνοής της καλλιέργειας όπως αυτή υπολογίστηκε από μετρήσεις με το πορόμετρο, με αυτή που μετρήθηκε με το λυσίμετρο. (α) Μετρήσεις με πορόμετρο σε φύλλα ηλικίας 30-45 ημερών, (β) Μετρήσεις με πορόμετρο σε φύλλα ηλικίας 15-30 ημερών.

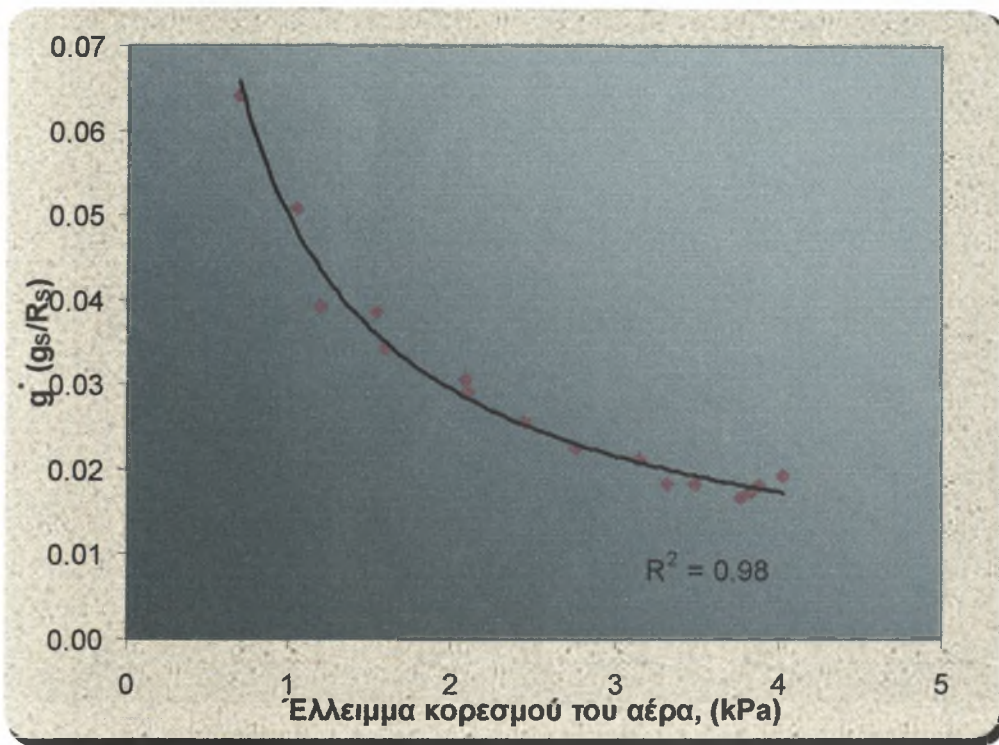
5.2 Στοματική αγωγιμότητα

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η πορεία της αγωγιμότητας κατά τη διάρκεια διαφόρων ημερών. Κάτι αντίστοιχο με την πορεία της διαπνοής φαίνεται να ισχύει και για τη στοματική αγωγιμότητα, με τη διαφορά ότι οι μέγιστες τιμές παρατηρούνται 2 με 3 ώρες νωρίτερα, δηλαδή περίπου στις 11:00.



Σχήμα 4. Ημερήσια πορεία της αγωγιμότητας.

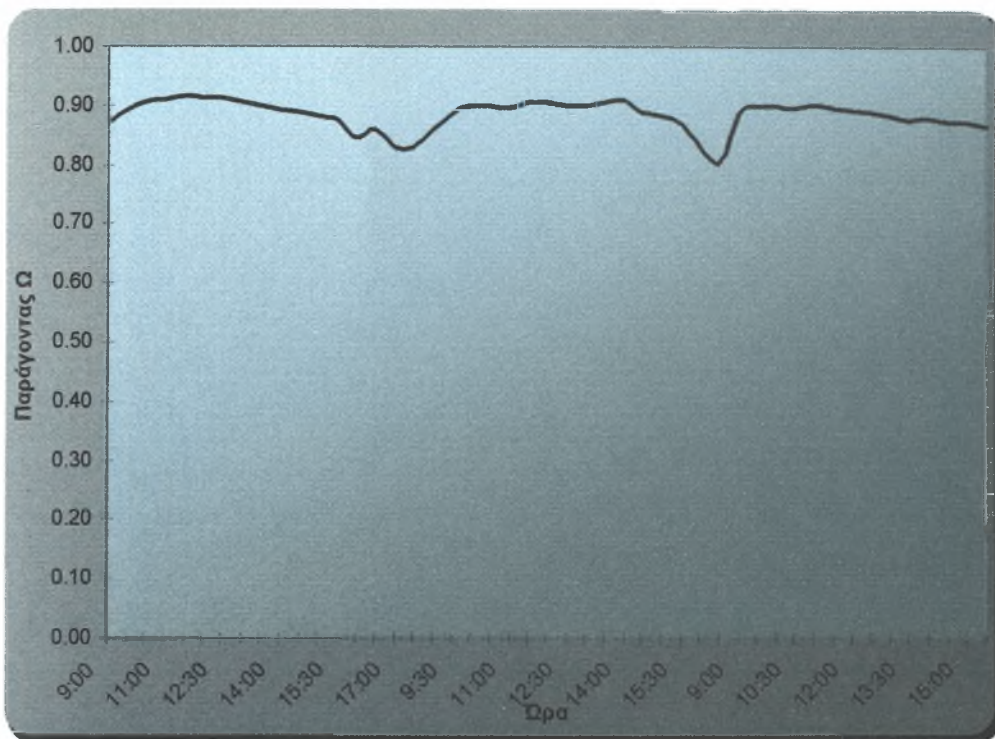
Παρατηρήθηκε ημερήσια υστέρηση στην πορεία της στοματικής αγωγιμότητας σε συνάρτηση με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται). Προκειμένου να απομακρυνθεί η υστέρηση και να μελετηθεί η επίδραση του ελλείμματος κορεσμού στη στοματική αγωγιμότητα, υπολογίστηκε η ομαλοποιημένη αγωγιμότητα ($g^* = g_s/R_s$). Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η σχέση της ομαλοποιημένης αγωγιμότητας σε συνάρτηση με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα.



Σχήμα 5. Σχέση της g^* με το VPD.

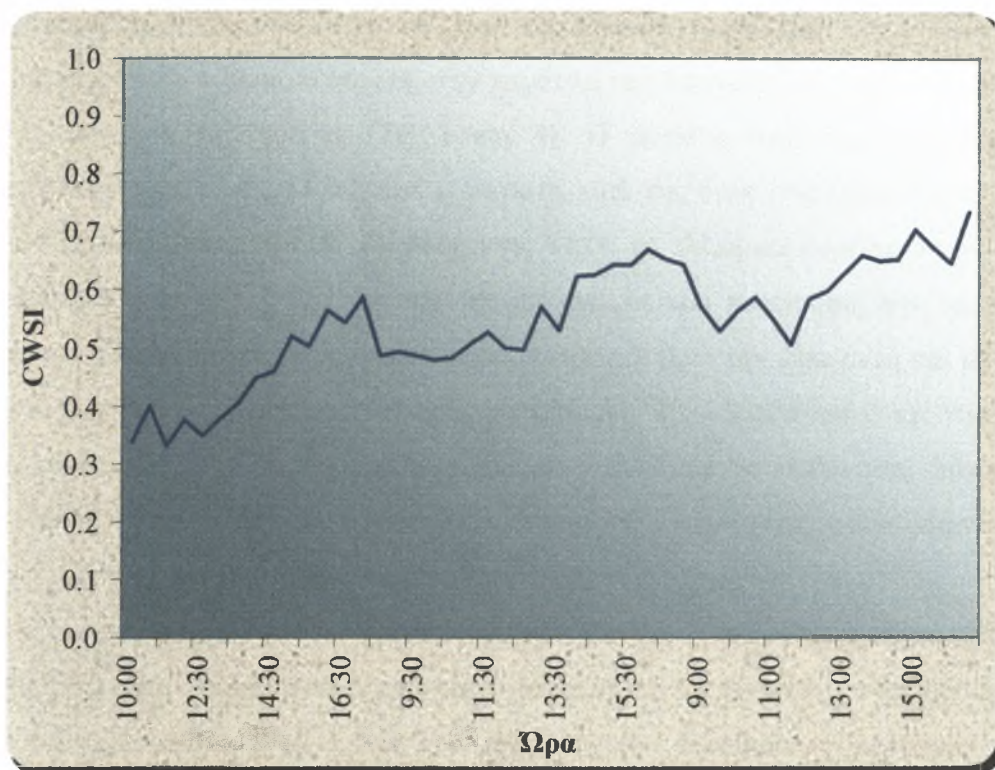
5.3 Παράγοντας Ω και CWSI

Με τη χρήση της εξίσωσης 2.5 υπολογίστηκε ο παράγοντας Ω . Η μέση τιμή του κατά τη διάρκεια των ημερών μέτρησης βρέθηκε ίση με 0.84. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία του παράγοντα Ω για διάφορες ημέρες.



Σχήμα 6. Ημερήσια πορεία του παράγοντα “ Ω ”.

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η πορεία του δείκτη υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας (CWSI), όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση 2.16, για τρεις από τις ημέρες των μετρήσεων. Η μέση τιμή του δείκτη CWSI βρέθηκε ίση με 0.54.



Σχήμα 7. Ημερήσια πορεία του CWSI.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ –ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα επίπεδα της διαπνοής που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν αρκετά υψηλά, σε σχέση με την εισερχόμενη ακτινοβολία. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση φύλλων ηλικίας περίπου 15 –30 ημερών τα οποία βρίσκονταν σε ανθοφόρους βλαστούς, το 90 % περίπου της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέποταν σε λανθάνουσα ενέργεια μέσω της διαπνοής (Σχήμα 2).

Παρατηρήθηκε παρόμοια πορεία στην καμπύλη της διαπνοής και της αγωγιμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας (Σχ. 1 και 4). Η μέγιστη τιμή της αγωγιμότητας εμφανιζόταν περίπου στις 11:00, ενώ η μέγιστη τιμή της διαπνοής εμφανιζόταν μετά από δυο (2) ώρες περίπου (13:30). Μέχρι τις 11:00 το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ήταν μικρότερο από τα 2 kPa (το σχετικό διάγραμμα που περιγράφει την ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού δεν παρουσιάζεται). Από την ώρα αυτή και μετά το έλλειμμα κορεσμού ξεπερνούσε την κρίσιμη τιμή των 1.5 –2 kPa και η αγωγιμότητα άρχισε να μειώνεται. Παρ' όλα αυτά η διαπνοή συνέχιζε να αυξάνεται, λόγω της μεγαλύτερης αύξησης του ελλείμματος κορεσμού του αέρα, έως ότου φθάσει στη μέγιστη τιμή της στις 13:30 περίπου το μεσημέρι.

Η κανονικοποίηση της αγωγιμότητας με την ηλιακή ακτινοβολία απομάκρυνε την υστέρηση (που παρατηρείται στην αγωγιμότητα σε σχέση με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα) και μας επέτρεψε να δούμε την επίδραση του ελλείμματος κορεσμού στην αγωγιμότητα (Σχ. 5). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κανονικοποιημένη αγωγιμότητα μειώνεται εκθετικά όταν το έλλειμμα κορεσμού του αέρα αυξάνεται και μάλιστα με μεγαλύτερο ρυθμό όταν ξεπερνά την τιμή των 1.5 –2 kPa.

Οι τιμές του παράγοντα Ω (σχήμα 6), όπως αυτός υπολογίστηκε από την εξίσωση 2.5, που παρατηρήθηκαν ήταν σχετικά μεγάλες (μέση τιμή 0.84) και κοντά σε αυτές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Jarvis, P.G., 1985). Αυτό σημαίνει ότι παρ' όλο του ότι οι μετρήσεις έγιναν το καλοκαίρι όπου τα παράθυρα είναι ανοικτά και επικρατούν σχετικά υψηλές ταχύτητες ανέμου, σε σχέση με αυτές που επικρατούν κατά τη διάρκεια του χειμώνα, αλλά χαμηλές συγκρινόμενες με τις εξωτερικές, το μεγαλύτερο μέρος της διαπνοής οφειλόταν σε παράγοντες ακτινοβολίας. Οι τιμές αυτές υποδηλώνουν ότι η καλλιέργεια δεν ήταν συζευγμένη με τον αέρα του θερμοκηπίου.

Τέλος, οι τιμές της αγωγιμότητας που μετρήθηκαν στην προκειμένη περίπτωση με το πορόμετρο, βρέθηκαν κοντά σε αυτές που υπολογίστηκαν από μετρήσεις με λυσίμετρο από τους Katsoulas et al., (2000), για μια μη συζευγμένη καλλιέργεια και μικρότερες κατά 50 % περίπου από τη μέση τιμή της αγωγιμότητας που υπολογίστηκε σε μια σχετικά συζευγμένη καλλιέργεια, υπό συνθήκες δροσισμού με τεχνητή ομίχλη.

Κατά τον υπολογισμό του δείκτη υδατικής κατάστασης CWSI, παρατηρήθηκε ότι είχε χαμηλές τιμές τις πρωινές ώρες και αυξανόταν συνεχώς στη συνέχεια, έως ότου έπαιρνε τη μέγιστη τιμή του νωρίς το απόγευμα. Η μέση τιμή του δείκτη CWSI, όπως αυτός υπολογίστηκε από την εξίσωση 2.16, βρέθηκε ίση με 0.54. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η καλλιέργεια βρισκόταν σε μια μέση υδατική κατάσταση. Οι τιμές αυτές ήταν κοντά σε αυτές που υπολογίστηκαν από τους Kittas et al., (2000), για μια καλλιέργεια με χαμηλό δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI=2) και μεγαλύτερες από αυτές που υπολογίστηκαν από τους Katsoulas et al., (2000), για μια καλλιέργεια με μεγάλο δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI=4).

Όταν τα φύλλα που μετρήθηκαν με το πορόμετρο βρίσκονταν σε πλάγιους λυγισμένους βλαστούς, ηλικίας 30 –45 ημερών, η σχέση της διαπνοής που μετρήθηκε με το λυσίμετρο ήταν : $E_{\lambda\omega\varsigma} \approx 0.85 E_{\pi\omicron\rho}$, ενώ όταν τα φύλλα που μετρήθηκαν με το πορόμετρο βρίσκονταν σε ανθοφόρους βλαστούς, ηλικίας 15 –30 ημερών, η προηγούμενη σχέση γινόταν : $E_{\lambda\omega\varsigma} \approx 0.42 E_{\pi\omicron\rho}$. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να συμπεράνουμε ότι :

- Η διαπνοή που υπολογίστηκε από φύλλα μέσης ηλικίας που βρίσκονταν χαμηλά, είναι κοντά στην τιμή της διαπνοής που υπολογίστηκε από το λυσίμετρο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η μέση τιμή της ηλικίας των φύλλων ενός ώριμου φυτού (που χρησιμοποιήθηκε για μέτρηση με το λυσίμετρο), είναι μεγαλύτερη από την ηλικία των φύλλων που χρησιμοποιήθηκαν για μέτρηση με το πορόμετρο στην προκειμένη περίπτωση.
- Τα φύλλα που βρίσκονταν σε υψηλότερη θέση και ήταν μικρότερης ηλικίας, διέπνεαν με το διπλάσιο ρυθμό, συγκρινόμενα με αυτά που βρίσκονταν χαμηλά και ήταν λίγο μεγαλύτερης ηλικίας. Αυτό μπορεί να οφείλεται στα διαφορετικά ποσά ακτινοβολίας που δέχονται τα φύλλα μεταξύ των δυο επιπέδων και τις διαφορές στην αεροδυναμική αγωγιμότητα που πιθανόν να υπάρχουν στα φύλλα μεταξύ των δυο θέσεων .

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν πιο πάνω, προκύπτει το γεγονός ότι οι εκτιμήσεις τόσο της διαπνοής, όσο και της αγωγιμότητας με τη χρήση πορομέτρου, για φύλλα ηλικίας 30-45 ημερών, ήταν σε αρκετά καλή συμφωνία με αυτές άλλων μεθόδων, παρά τις όποιες διαφωνίες υπάρχουν στην επιστημονική κοινότητα όσο αναφορά την ακρίβεια των εκτιμήσεων με χρήση πορομέτρου (Idso et.al., 1986, Idso et. al., 1988), οι οποίες πιθανόν να οφείλονται στο ότι δεν έγινε διαχωρισμός των πειραματικών φύλλων σε κατηγορίες ανά ηλικία. Μπορεί να υποστηριχθεί ότι η πορομετρία μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο στην επιστημονική έρευνα (απλότητα χρήσης), με την προϋπόθεση ότι τηρούνται όλες οι απαραίτητες προφυλάξεις που εξασφαλίζουν ασφαλείς μετρήσεις.

Ενδιαφέρον θα ήταν να μελετηθεί η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στα διάφορα επίπεδα μέσα στην καλλιέργεια και το φυτό. Παράλληλα, η μελέτη της αεροδυναμικής αγωγιμότητας των φύλλων, η οποία μέχρι τώρα θεωρείται σταθερή στα διάφορα επίπεδα μέσα στην καλλιέργεια (θεωρείται "big leaf"), σε συνάρτηση με την εκτίμηση της στοματικής αγωγιμότητας μέσα από αναλυτικά μοντέλα, στο επίπεδο του φυτού, θα βοηθήσει στην καλύτερη εκτίμηση του ρυθμού διαπνοής, στο επίπεδο του φυτού και της καλλιέργειας και στη βελτίωση του ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aphalo, P.J., Jarvis, P.G. (1993). The boundary layer and the apparent responses of stomatal conductance to wind speed and to the mole fractions of CO₂ and water vapour in the air. *Plant, Cell and Environment*, 16: 771-783.

Avissar, R., Avissar, P., Mahrer, Y., Bravdo, B.A. (1985). A model to simulate responses of plant stomata to environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 34: 21-29.

Baille, M., Romero-Aranda, R., Baille A. (1996). Stomatal conductance of rose whole plants in greenhouse conditions: analysis and modeling. *Journal of Horticultural Science*, 71: 957-970.

Bunce, J.A. (1985). Effect of boundary layer conductance on the response to stomata humidity. *Plant, Cell and Environment*, 8: 55-57.

Clawson, K.L., Jackson, R.D., Pinter Jr, P.J. (1989). Evaluating plant water stress with canopy temperature differences. *Agronomy Journal*, 81: 858-863.

Cowan, I.R. (1977). Stomatal behavior and environment. *Advanced Botany Research*, 4: 117-227.

Day, W. (1977). A direct reading continuous flow porometer. *Agricultural and Meteorology*, 18: 81-89.

Finnigan, J.J., Raupach, M.R. (1987). Modern theory of transfer in plant canopies in relation to stomatal characteristics. *Stomatal Function*, pp385-429. Stanford University Press, Stanford, CA.

Gardner, B.R., Blad, B.L., Garrity, D.P., Watts, D.G. (1981). Relationships between crop temperature, grain yield, evapotranspiration and phenological development in two hybrids of moisture stressed sorghum. *Irrigation Science*, 2: 213-224.

Gutierrez, M.V., Meinzer, F.C., Grantz, D.A. (1994). Regulation of transpiration in coffee hedgerows: covariation of environmental variables and apparent responses of stomata to wind and humidity. *Plant, Cell and Environment*, 17: 1305-1313.

Gutierrez, R.P., Gonzalez-Real, M.M., Baille, A. (2000). *Conference Proceeding*. International Symposium on protected cultivation in mild winter climates: Current trends for sustainable technologies, Spain.

Hanan, N.P., Prince, S.D. (1997). Stomatal conductance of West Central Supersite vegetation in HAPEX-Sahel: measurements and empirical models. *Journal of Hydrology*, HAPEX-Sahel special issue.

Huntingford, C., Allen, S.J., Harding, R.J. (1995). An intercomparison of single and dual-source vegetation-atmosphere transfer models applied to transpiration from Sahelian savannah. *Boundary Layer Meteorology*, 74: 396-418.

Idso, S.B., Jackson, R.D., Reginato, R.J. (1977). Remote sensing of crop yields. *Science*, 196:19-25.

Idso, S.B., Clawson, K.L., Anderson, M.G. (1986). Foliage temperature: effects of environmental factors. *Water Resources Research*, 22: 1702-1716.

Idso, S.B., Allen, S.G., Kimball, B.A. (1987). The perils of porometry. In: *Proceedings of International Conference on the Measurements of Soil and Plant Water Status*. Logan, Utah, Vol. 2, pp. 133-138.

Idso, S.B., Allen, S.G., Choudbury, B.I. (1988). Problems with porometry: measuring stomatal conductances of potentially transpiring plants. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43: 49-58.

Instruction Manual of LI-1600M, Revision 6, 1989, Licor inc.

Jackson, R.D., Reginato, R.J., Idso, S.B. (1977). Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13: 651-656.

Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter Jr, P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17: 1133-1138.

Jarvis, P.G. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of Royal Society of London, Series B*: 273: 593-610.

Jarvis, P.G. (1985). Coupling of transpiration to the atmosphere in horticultural crops: the omega factor. *Acta Horticulturae*, 171: 187-205.

Jarvis, P.G., McNaughton, K.G. (1986). Stomatal control of transpiration: Scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15: 1-49.

Jones, H.G. (1983). Plants and microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology. *Cambridge University Press*, Cambridge, p 323.

Katsoulas, N., Baille, A., Kittas, C. (2000). Effect of misting on transpiration and conductances of greenhouse rose canopy. Submitted to *Agricultural and Forest Meteorology*.

Kittas, C., Katsoulas, N., Baille, A. (1999). *Conference Proceeding*. Transpiration and canopy resistance of greenhouse soilless roses: measurements and modeling. 3rd

International Workshop on: "Models for plant growth and control of the shoot and root environment in greenhouses". The Volcani Center, Bet Dangan, Israel, February 21-25.

Kittas, C., Katsoulas, N., Baille, A. (2000). Influences of greenhouse ventilation regime on microclimate and energy partitioning of a rose canopy during summer conditions. Submitted to *Journal of Agricultural in Engineering Resources*.

Landsberg, J.J., Beadle, C.L., Biscoe, P.V., Butler, D.R., Davidson, B., Incoll, L.D., James, G.B., Jarvis, P.G., Martin, P.J., Neilson, R.E., Powell, D.B.B., Slack, E.M., Thorpe, M.R., Turner, N.C., Warritt, B., Watts, W.R. (1975). Diurnal energy, water and CO₂ exchanges in an apple (*Malus pumila*) orchard. *Journal of Applied Ecology*, 12: 659-684.

McDermitt, D.K. (1990). Sources of error in the estimation of stomatal conductance and transpiration from porometer data. *Hortscience*, 25: 1538-1547.

McNaughton, K., Jarvis, P.G. (1983). Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: K.T. (Ed), *Water Deficits and Plants Growth*, vol.VII. Academic Press, pp. 1-47.

Monteith, J.L., Unsworth, M.H. (1973,1990). *Principles of enviromental physics*. Edward Arnold, London. First Edition 1973, Second Edition 1990.

Monteith, J.L. (1981). Evaporation and surface temperature. *Journal of Resources in Meteorology*, 107: 1-27.

Monteith, J.L. (1990). Porometry and baseline analysis: the case for compatibility. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49: 155-167.

Monteith, J.L. (1995). A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell and Environment*, 18: 357-364.

Paw, U.K.T., Daughtry, C.S.T. (1984). A new method for the estimation of diffusive resistance of leaves. *Agricultural and Forest Meteorology*, 33: 141-155.

Pearcy, R.W., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Rundel, P.W. (1989). Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation. *Chapman and Hall, London*.

Phillip, M. (1989). The significance of radiative coupling between vegetation and the atmosphere. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49: 45-53.

Schulze, E.D., Hall, A.E., Lange, O.L., Walz, H. (1982). A portable steady-state porometer for measuring the CO₂ and water vapour exchanges of leaves under natural conditions. *Oecologia*, 53: 141-145.

Schulze, E.D. (1986). CO₂ and water vapour exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annual Review of Plant Physiology*, 37: 247-274.

Stanghellini, C. (1987). Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. Thesis, *Wageningen Agricultural University*, The Netherlands.

Tan, C.S., Black, T.A., Nnyamah, J.U. (1978). A simple diffusion model of transpiration applied to a thinned Douglas-Fir stand. *Ecology*, 59: 1221-1229.

Thom, A.S., Oliver, H.R. (1977). On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 103: 345-357.

Tyree, M.T., Wilmot, T.R. (1990). Errors in the calculation of evaporation and leaf conductance in steady-state porometry: the importance of accurate measurement of leaf temperature. *Canadian Journal of Forestry Research*, 20: 1031-1035.

Verhoef, A. (1997). The effect of temperature differences between porometer head and leaf surface on stomatal conductance measurements. *Plant, Cell and Environment*, 20: 641-646.

Watts, W.R. (1977). Fields studies of stomatal conductance, p. 173-196. In: J.J. Landsberg and C.V. Cutting, (eds.). *Environmental effects on crop physiology*. Academic, London.

Yang, X., Short, T.H., Fox, R.D., Bauerle, W.L. (1989). The microclimate and transpiration of a greenhouse cucumber crop. *ASAE*, 36: 2143-2149.

