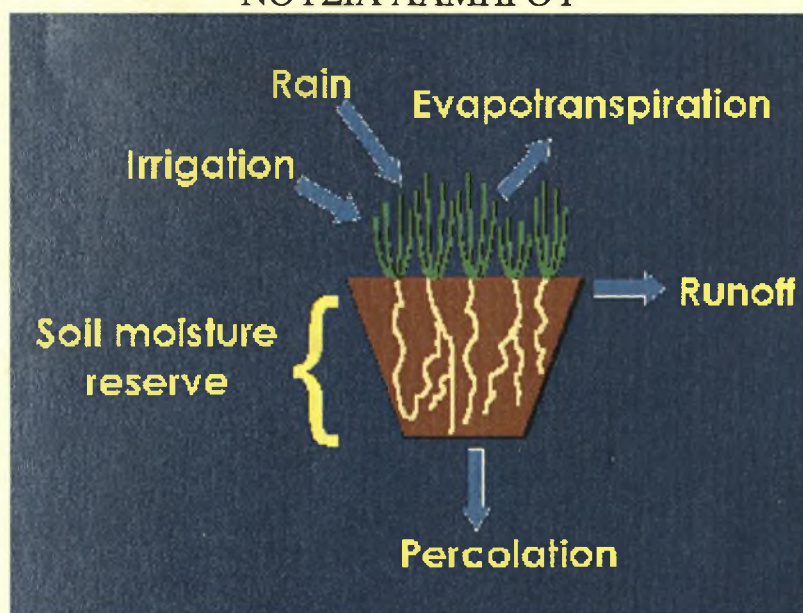


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

«ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΑΣΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ»

**ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ
ΝΟΥΣΙΑ ΛΑΜΠΡΟΥ**



**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ
Μ. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ- ΜΑΚΡΑΝΤΩΝΑΚΗ**

ΒΟΛΟΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2006



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

Αριθ. Εισ.:	4923/1
Ημερ. Εισ.:	15-09-2006
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ - ΦΠΑΠ
	2006
	ΝΟΥ

*Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη
στους γονείς μου, Νίκο και Ελένη
και στον αδερφό μου Κώστα.*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
	ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	6
1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ.....	7
1.1	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ.....	7
1.1.1	Εξάτμιση.....	7
1.1.2	Διαπνοή.....	8
1.1.3	Εξατμισοδιαπνοή (ΕΤ).....	9
1.1.4	Μονάδες.....	10
1.2	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ....	11
1.2.1	Κλιματικές παράμετροι.....	12
1.2.2	Παράγοντες καλλιέργειας.....	12
1.2.3	Περιβαλλοντικοί παράγοντες και παράγοντες διαχείρισης.....	12
1.3	ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ.....	13
1.4	ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ΕΤ _ο).....	13
1.5	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ (ΕΤ _ς).....	14
1.6	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΜΗ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ΕΤ _{cadj}).....	15
1.7	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ.....	15
1.7.1	Μέτρηση της ΕΤ.....	15
1.7.2	Ισοζύγιο ενέργειας και μικροκλιματικές μέθοδοι.....	15
1.7.3	Ισοζύγιο εδαφικού νερού.....	17
1.7.4	Λυσίμετρα.....	18
1.7.5	Μέτρηση της ΕΤ από μετεωρολογικά δεδομένα.....	18
1.7.6	Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από το εξατμισίμετρο.....	19
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: Η ΕΞΙΣΩΣΗ PENMAN-MONTEITH.....	20
2.1	ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ ΜΙΑΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΤ _ο	20
2.2	ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ PENMAN-MONTEITH.....	22
2.2.1	Αεροδυναμική αντίσταση (r _a).....	23
2.2.2	Επιφανειακή αντίσταση (r _s).....	24
2.3	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	26
2.4	Η ΕΞΙΣΩΣΗ FAO PENMAN-MONTEITH.....	28
2.4.1	Η εξίσωση.....	28
2.4.2	Δεδομένα.....	30
2.4.3	Τοποθεσία.....	30
2.4.4	Θερμοκρασία.....	30
2.4.5	Υγρασία.....	31
2.4.6	Ακτινοβολία.....	31
2.4.7	Ταχύτητα του ανέμου.....	31
2.4.8	Κλιματικά δεδομένα που λείπουν.....	31
2.5	ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.....	32
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	39
3.1	ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΤ... 3.1.1 Ηλιακή ακτινοβολία.....	39
3.1.2	Θερμοκρασία του αέρα.....	40
3.1.3	Υγρασία του αέρα.....	40
3.1.4	Ταχύτητα του ανέμου.....	41
3.2	ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	42
3.2.1	Ατμοσφαιρική πίεση (Ρ).....	42
3.2.2	Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (λ).....	42

3.2.3	Ψυχρομετρική σταθερά (γ).....	43
3.3	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ.....	43
3.4	ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ.....	45
3.4.1	Τάση ατμών.....	45
3.4.2	Σημείο δρόσου.....	47
3.4.3	Σχετική υγρασία.....	47
3.4.4	Μέτρηση.....	47
3.5	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ.....	49
3.5.1	Μέση πίεση κορεσμού των υδρατμών (e_s).....	49
3.5.2	Κλίση της καμπύλης «πίεση κορεσμού υδρατμών-θερμοκρασίας» (Δ).....	49
3.5.3	Πραγματική τάση ατμών (e_a) υπολογιζόμενη από το σημείο δρόσου.....	50
3.5.4	Πραγματική τάση ατμών (e_a) υπολογιζόμενη από ψυχρομετρικά δεδομένα.....	50
3.5.5	Πραγματική τάση ατμών (e_a) υπολογιζόμενη από δεδομένα σχετικής υγρασίας.....	51
3.5.6	Έλλειμμα τάσης ατμού ($e_s - e_a$).....	52
3.6	ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	53
3.6.1	Θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία (R_a).....	53
3.6.2	Ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους (R_s).....	54
3.6.3	Σχετική μικρού μήκους ακτινοβολία (R_s/R_a).....	54
3.6.4	Σχετική διάρκεια ηλιοφάνειας (n/N).....	55
3.6.5	Συντελεστής ανακλαστικότητας (α) και καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (R_{ns}).....	55
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ.....	57
4.1	Η ΕΞΙΣΩΣΗ PENMAN-MONTEITH.....	57
4.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ.....	58
4.2.1	Φύλλο υπολογισμού.....	58
4.2.2	Αυτοματοποιημένοι υπολογισμοί.....	59
4.2.3	Υπολογισμός της ET_o με διαφορετικά χρονικά βήματα.....	60
4.2.4	Δεκαήμερο ή μηνιαίο χρονικό βήμα.....	60
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΜΟΝΟΣ ΦΥΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ K_c.....	68
5.1	Η ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ.....	70
5.1.1	Αρχική πηγή: Η άρδευση και αποστράγγιση κατά FAO.....	70
5.2	ΦΥΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ (K_{cini}).....	71
5.2.1	Υπολογιστική διαδικασία.....	71
5.3	ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΣΕΩΝ.....	76
5.3.1	Εξάτμιση από την ατμόσφαιρα.....	76
5.3.2	Η σπουδαιότητα του γεγονότος άρδευσης.....	77
5.3.3	Χρονικά διαστήματα μεταξύ των αρδεύσεων.....	77
5.3.4	Βαθιές διυγράνσεις (βάθη διήθησης 40 mm ή περισσότερο): επιφανειακή άρδευση και τεχνητή βροχή.....	79
5.3.5	Μέση άρδευση (βάθη διήθησης μεταξύ 10 και 40 mm).....	80
5.3.6	Ρύθμιση για μερική διύγρανση από άρδευση.....	80
5.3.7	K_{cini} για δένδρα και θάμνους.....	82
5.3.8	K_{cini} για αναποφλοίωτο ρύζι.....	82
5.4	ΦΥΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΤΑΔΙΟ ΜΕΣΗΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥ.....	82
5.5	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ K_{cmid}	84
5.5.1	Ρύθμιση της συχνότητας άρδευσης.....	86
5.6	ΦΥΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ.....	86
5.7	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ K_c ΚΑΜΠΥΛΗΣ.....	87
5.7.1	Ετήσιες καλλιέργειες.....	87
5.7.2	K_c καμπύλες για καλλιέργειες ζωοτροφές.....	88

5.7.3	Αριθμητικός προσδιορισμός του K_c	89
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ	
	ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ.....	90
6.1	ΜΕΘΟΔΟΙ BLANEY-CRIDDLE.....	190
6.2	ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΑΚΚΙΝΚ.....	97
6.3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΕΝΜΑΝ.....	97
6.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΗΑΡΓΡΕΑΒΕΣ.....	102
6.5	ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΙΕΣΤΛΕΥ-ΤΑΥΛΟΡ.....	102
6.6	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΖΕΝΣΕΝ-ΧΑΙΣΕ.....	103
6.7	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΜΕ ΕΞΑΤΜΙΣΙΜΕΤΡΟ.....	103
6.8	ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗ ΤΩΝ ΑΛΛΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣ ΤΗ	
	ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΡΕΝΜΑΝ-ΜΟΝΤΕΙΤΗ.....	105
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	107
7.1	Γενικά	107
7.2	Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός	
	άρδευσης καλλιέργειας βαμβακιού για το έτος 2000.....	108
7.3	Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός	
	άρδευσης καλλιέργειας βαμβακιού για το έτος 2001.....	111
7.4	Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός	
	άρδευσης καλλιέργειας βαμβακιού για το έτος 2002.....	114
7.5	Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός	
	άρδευσης καλλιέργειας βαμβακιού για το έτος 2003.....	117
7.6	Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός	
	άρδευσης καλλιέργειας βαμβακιού για το έτος 2004.....	120
7.7	Μηνιαία εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με διάφορες μεθόδους.....	123
7.8	Συντελεστές προσαρμογής.....	125
7.9	Μέσος όρος των μηνιαίων συντελεστών προσαρμογής για την	
	πενταετία 2000-2004.....	128
7.10	Συμπεράσματα.....	129
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΜΟΝΑΔΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΒΟΛΑ.....	131
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΙΝΑΚΕΣ.....	133
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	140

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το νερό, βασικό στοιχείο κάθε βιολογικής διαδικασίας, διαδραματίζει το σημαντικότερο ρόλο στη ζωή του ανθρώπου και αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες της οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης κάθε χώρας.

Στην προοπτική των δύο επόμενων δεκαετιών μάλιστα, εκτιμάται ότι το νερό θα αποτελέσει τον πλέον κρίσιμο περιοριστικό παράγοντα για την επιβίωση και την ανάπτυξη των περισσότερων αναπτυσσόμενων, αλλά και πολλών ήδη αναπτυγμένων χωρών στον κόσμο.

Οι δυσοίωνες προβλέψεις αυτές, που δεν είναι ούτε άγνωστες αλλά ούτε καινούργιες, πρέπει επιτέλους να κρούσουν τον κώδωνα του κινδύνου και να μας οδηγήσουν στην αποδοχή της κρίσης, τόσο για την επάρκεια, όσο και για τον τρόπο διαχείρισης του ζωτικού αυτού φυσικού πόρου που λέγεται νερό.

Βάση για τη χάραξη της οποιασδήποτε στρατηγικής για τους υδατικούς πόρους πρέπει να αποτελεί η εξισορρόπηση ανάμεσα στην προσφορά και τη ζήτηση νερού, μέσα σε ένα διαχρονικό πλαίσιο ποσοτικής και ποιοτικής διατήρησης των χαρακτηριστικών των πόρων αυτών. Οι υδατικοί πόροι χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών σε νερό της γεωργίας, των κατοίκων των αστικών και τουριστικών περιοχών, της βιομηχανίας και για την διατήρηση των ισορροπιών του περιβάλλοντος, (Καλφούντζος, 2002).

Ο κύριος χρήστης νερού είναι η γεωργία, με συμμετοχή που ανέρχεται στο 87,4% των υδάτων της χώρας, σύμφωνα με πρόσφατα στοιχεία της Eurostat, αρδεύοντας σήμερα 14,5 εκατ. στρ. έναντι 8,5 εκατ. του 1985 και 2 εκατ. του 1970. Για τον λόγο αυτό έχει ιδιαίτερη βαρύτητα η ανάλυση της υφισταμένης κατάστασης που διαμορφώνει αυτό το επίπεδο ζήτησης με αποτέλεσμα την διερεύνηση δυνατοτήτων εξοικονόμησης νερού μέσα από κατάλληλες ενέργειες και επεμβάσεις. Η συνεχής αύξηση της ζήτησης νερού για άρδευση άσκησε ισχυρότατη πίεση στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους της χώρας.

Γενική είναι η διαπίστωση ότι το υφιστάμενο σήμερα καθεστώς στον τομέα των αρδεύσεων οδηγεί σε μεγάλη σπατάλη νερού. Ένα από τα βασικότερα αίτια

της σπατάλης αυτής είναι ο μη ακριβής προσδιορισμός των αναγκών σε νερό άρδευσης των καλλιεργειών. Η σχεδίαση των μεγάλων αρδευτικών έργων στην χώρα μας για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής έγινε με ξεπερασμένες μεθόδους οι οποίες υπερεκτιμούν τις ανάγκες σε ποσοστό μεγαλύτερο του 30%. Το ύψος των απωλειών νερού είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη σωστή εφαρμογή της άρδευσης, η οποία προϋποθέτει τον ακριβή υπολογισμό της αρδευτικής δόσης, τον προσδιορισμό του χρόνου εφαρμογής των αρδεύσεων που καθορίζεται από την διακύμανση της εξατμισοδιαπνοής και της βροχής κατά την διάρκεια της βλαστικής περιόδου, τον προσδιορισμό της διάρκειας της άρδευσης που καθορίζεται από τη διηθητικότητα του εδάφους και την εφαρμοζόμενη μέθοδο. Για να επιτευχθεί η εξοικονόμηση αρδευτικού νερού απαιτείται αρδευτική παιδεία και επιδεξιότητα από τον αγρότη η οποία προϋποθέτει επί τόπου υποστήριξη από γεωπόνους γνώστες του αντικειμένου.

Η διαθεσιμότητα νερού έχει φθάσει στα όριά της και η μόνη εναλλακτική λύση που απομένει είναι η ανάπτυξη τεχνικών εξοικονόμησης, ώστε η ζήτηση να σταθεροποιηθεί στα σημερινά επίπεδα ή να περιορισθεί κάτω από τα επίπεδα αυτά. Τα τελευταία χρόνια άρχισαν να αναθεωρούνται παλαιές αντιλήψεις, όπως είναι η μετάπτωση από την **αρχή της μεγιστοποίησης της παραγωγής ανά μονάδα επιφανείας γης σε αυτή της βελτιστοποίησης της παραγωγής ανά μονάδα διαθέσιμου νερού**.

Οι καλλιέργειες, όταν έχουν στην διάθεσή τους νερό χωρίς κανένα περιορισμό, καταναλώνουν ποσότητες οι οποίες ρυθμίζονται από τις συνθήκες που επικρατούν στην ατμόσφαιρα που τις περιβάλλει. Αποτέλεσμα αυτού είναι αύξηση της βλάστησης που δεν σημαίνει κατ' ανάγκη αύξηση της παραγωγής. Η σύγχρονη αντίληψη στη γεωργία αποβλέπει στη μεγιστοποίηση του οικονομικού αποτελέσματος και οι ανάγκες σε νερό μιας καλλιέργειας πρέπει να προσδιορίζονται σαν αυτές που αποφέρουν το μέγιστο οικονομικό αποτέλεσμα. Οι ανάγκες αυτές εκφράζονται από την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας. Η εξατμισοδιαπνοή αυτή βασίζεται στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και στους φυτικούς συντελεστές που αντιπροσωπεύουν τις ιδιαιτερότητες της κάθε καλλιέργειας.

Η ορθή εκτίμηση του νερού που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών των καλλιεργειών συμβάλλει στην εξοικονόμηση του, δεδομένου ότι σε αρκετές περιοχές της χώρας μας, τα υπάρχοντα νερά από πηγές, ποταμούς και

γεωτρήσεις δεν επαρκούν για να καλύψουν τις ανάγκες για άρδευση, βιομηχανία και αστική χρήση.

Σήμερα, που ο υπόγειος ορίζοντας έχει κατέβει σημαντικά οι ανάγκες αυτές γίνονται όλο και περισσότερο αισθητές στις αρδεύσεις και το πρόβλημα του υδατικού ισοζυγίου ιδιαίτερα οξύ.

Με την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε τις ημερήσιες, μηνιαίες ή και ετήσιες ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό κι επομένως να προχωρήσουμε στον αρδευτικό σχεδιασμό, εξοικονομώντας χρήματα άλλα κυρίως νερό. Πριν ξεκινήσουμε όμως την σύγκριση, είναι σκόπιμο να κάνουμε μια εισαγωγή στις παραπάνω μεθόδους, αναλύοντας ορισμένες βασικές έννοιες, απαραίτητες για την κατανόηση της μεθοδολογίας τους.

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας αναλύονται ορισμένες βασικές έννοιες σχετικές με την εξατμισοδιαπνοή, αναφέρονται οι μονάδες μέτρησης καθώς και οι παράγοντες οι οποίοι την επηρεάζουν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της εξίσωσης Penman-Monteith καθώς και όλων των παραγόντων της ενώ στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στους μετεωρολογικούς παράγοντες που αποτελούν τα συστατικά της εξίσωσης. Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας περιγράφεται διεξοδικά η διαδικασία υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Penman-Monteith (φύλλο υπολογισμού, αυτοματοποιημένοι υπολογισμοί κ.α.). Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται ο μόνος φυτικός συντελεστής K_c που είναι απαραίτητος για την ορθή εκτίμηση της ΕΤ, αναφέρονται διάφορες τιμές του K_c για τις κυριότερες καλλιέργειες και περιγράφεται η κατασκευή της καμπύλης K_c .

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των υπολοίπων μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής.

Στη συνέχεια, στο έβδομο κεφάλαιο, μετά από μια σύντομη εισαγωγή και περιγραφή των στόχων του πειράματος, παρουσιάζονται πινακοποιημένα τα δεδομένα και οι μετρήσεις μας, γίνονται αναλύσεις και γραφικές απεικονίσεις και τέλος καταλήγουμε σε συμπεράσματα και προτάσεις.

2. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την πραγματοποίηση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας Θέλω να ευχαριστήσω την Επιβλέπουσα της Διπλωματικής , Καθηγήτρια του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Π.Θ., κ. Μαρία Σακελλαρίου –Μακραντωνάκη , η οποία μου πρότεινε το θέμα της Διπλωματικής και με παρότρυνε να ασχοληθώ με αυτό, καθώς επίσης για τις υποδείξεις της σε επιστημονικό επίπεδο και για την καθοδήγησή της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα μέλη κ. Νικόλαο Τσιρόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή και τον κ. Αθανάσιο Μαυρομάτη Λέκτορα , του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Π.Θ. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Δημήτριο Καλφούντζο γεωπόνο, Διδάκτορα της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Π.Θ. που οι ειδικές επιστημονικές του γνώσεις, αλλά και η πείρα του στην επιστήμη του νερού και ιδιαίτερα στον πειραματικό τομέα καθώς επίσης η αμέριστη συμπαράσταση του και φιλική διάθεση υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες σε όλη τη διάρκεια της Διπλωματικής μου Εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ.

Ο συνδυασμός δύο ξεχωριστών διαδικασιών με τις οποίες έχουμε απώλειες νερού, αφενός από την επιφάνεια του εδάφους με εξάτμιση και αφετέρου μέσω της διαπνοής των φυτών αναφέρεται σαν εξατμισοδιαπνοή (ΕΤ), (Παπαζαφειρίου, Ζ., 1991)

1.1.1 Εξάτμιση.

Εξάτμιση ονομάζεται η διαδικασία με την οποία το υγρό νερό μετατρέπεται σε υδρατμούς (υγροποίηση) και απομακρύνεται από την επιφάνεια εξάτμισης (απομάκρυνση ατμών). Το νερό εξατμίζεται από μια μεγάλη ποικιλία επιφανειών, όπως λίμνες, ποτάμια, πεζοδρόμια, έδαφος και υγρή βλάστηση.

Για την αλλαγή της κατάστασής των μορίων του νερού από υγρή σε αέρια απαιτείται ενέργεια. Η ενέργεια αυτή παρέχεται λοιπόν αφενός από την απευθείας ηλιακή ακτινοβολία και αφετέρου, σε πολύ μικρότερο βαθμό βέβαια, από την θερμοκρασία του αέρα. Η δύναμη που ωθεί το νερό στην απομάκρυνσή του από την επιφάνεια εξάτμισης είναι η διαφορά ανάμεσα στην τάση ατμών του νερού στην επιφάνεια εξάτμισης και την ατμοσφαιρική πίεση. Καθώς η διαδικασία της εξάτμισης προχωράει ο αέρας που περιβάλλει την παραπάνω επιφάνεια γίνεται σταδιακά κορεσμένος και έτσι η διαδικασία επιβραδύνεται και μπορεί ακόμη και να σταματήσει αν ο υγρός αέρας δεν μεταφερθεί στην ατμόσφαιρα. Η αντικατάσταση του υγρού κορεσμένου αέρα από ξηρότερο αέρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα του αέρα. Επομένως η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία του αέρα, καθώς και η ταχύτητα του ανέμου είναι κλιματολογικές παράμετροι στους οποίους δίνεται ιδιαίτερη έμφαση όταν επιχειρείται εκτίμηση της εξάτμισης.

Όταν η επιφάνεια εξάτμισης του νερού είναι το έδαφος, ο βαθμός σκίασης του εδάφους από τη φυλλική επιφάνεια και το ποσό του διαθέσιμου νερού στην παραπάνω επιφάνεια είναι άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την διαδικασία εξάτμισης. Οι συχνές βροχοπτώσεις, η άρδευση, καθώς και το

νερό που μεταφέρεται από (μια λεπτή επιφάνεια) είναι παράγοντες που συμβάλλουν στην άρδευση της επιφάνειας του εδάφους. Στις περιπτώσεις που το έδαφος είναι ικανό να παρέχει νερό αρκετά γρήγορα έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις της εξάτμισης, η εξάτμιση από το έδαφος καθορίζεται μόνο από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Όμως, όταν το χρονικό διάστημα μεταξύ των βροχοπτώσεων ή των αρδεύσεων γίνει μεγάλο και η ικανότητα του εδάφους να οδηγήσει την υγρασία κοντά στην επιφάνεια είναι μικρή, η περιεκτικότητα του νερού στα ανώτερα στρώματα του εδάφους περιορίζεται και η επιφάνεια του εδάφους ξηραίνεται. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η περιορισμένη διαθεσιμότητα του νερού ασκεί πιέσεις σε μεγάλο βαθμό στην εξάτμιση. Η πλήρης έλλειψη νερού από την επιφάνεια του εδάφους προκαλεί δραματική μείωση της εξάτμισης και μπορεί ακόμη και να προκαλέσει την παύση της μέσα σε λίγες μέρες.

1.1.2 Διαπνοή.

Η διαπνοή είναι μια διαδικασία κατά την οποία το υγρό νερό που περιέχεται στους φυτικούς ιστούς εξατμίζεται και απομακρύνεται στην ατμόσφαιρα. Τα φυτά χάνουν το μεγαλύτερο μέρος του νερού από τα στόματα. Αυτά είναι μικρά ανοίγματα στο φύλλο του φυτού δια μέσου των οποίων διαχέονται υδατμοί και άλλα αέρια. Το νερό, μαζί με ορισμένα θρεπτικά συστατικά, προσλαμβάνεται από τις ρίζες και μεταφέρεται μέσω των αγωγών ιστών σε ολόκληρο το φυτό. Σχεδόν όλο το νερό που προσλαμβάνεται από το φυτό χάνεται μέσω της διαπνοής και μόνο ένα μικρό ποσοστό του χρησιμοποιείται μέσα στο φυτό.

Η διαπνοή, όπως και η εξάτμιση, εξαρτάται από την παροχή ενέργειας, την τάση ατμών και τον άνεμο. Επομένως η ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία του αέρα και ο άνεμος είναι όροι που πρέπει να υπολογίζονται όταν γίνεται εκτίμηση της διαπνοής. Η διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού καθώς και η ικανότητα του εδάφους να "οδηγούν" το νερό στις ρίζες καθορίζουν το βαθμό της διαπνοής όπως κάνουν άλλωστε ο κορεσμός και η αλατότητα του εδαφικού νερού. Το ποσοστό της διαπνοής επηρεάζεται επίσης από τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, άλλες περιβαλλοντικές πτυχές και διάφορες καλλιεργητικές μέθοδοι. Διαφορετικά είδη φυτών μπορεί να έχουν διαφορετικό βαθμό διαπνοής. Έτσι κατά τη διαδικασία εκτίμησης της διαπνοής δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη μόνο το είδος της καλλιέργειας, αλλά και η ανάπτυξη της, το περιβάλλον και η διαχείριση του.

1.1.3 Εξατμισοδιαπνοή (ET).

Η εξάτμιση και η διαπνοή λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και δεν υπάρχει εύκολα τρόπος διάκρισης μεταξύ των δύο διαδικασιών. Εκτός από τη διαθεσιμότητα του νερού στα ανώτερα στρώματα του εδάφους, η εξάτμιση από ένα καλλιεργούμενο έδαφος καθορίζεται κυρίως από το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους. Το παραπάνω ποσοστό μειώνεται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, καθώς το φυτό αναπτύσσεται και η φυλλική επιφάνεια του σκιάζει όλο και περισσότερο το έδαφος. Όταν το φυτό είναι μικρό το νερό χάνεται κυρίως μέσω της εξάτμισης, αλλά όταν το φυτό αναπτυχθεί πλήρως και καλύψει το έδαφος, η διαπνοή γίνεται κύρια διαδικασία απώλειας νερού. Έτσι κατά την περίοδο της σποράς σχεδόν το 100% της ET προέρχεται από την εξάτμιση, ενώ κατά την περίοδο της πλήρους ανάπτυξης των φυτών περισσότερο από το 90% της ET προέρχεται από τη διαπνοή, (Allen, R.G. and Pruitt, W.O., 1991, FAO-24)

Ορισμοί που έχουν σχέση με την εξατμισοδιαπνοή

Υπολογισμοί και μετρήσεις της ET που έχουν γίνει κατά καιρούς χρησιμοποιούν διάφορους τρόπους και μεθοδολογίες. Για τον λόγο αυτό είναι χρήσιμο να παρατεθούν οι ορισμοί που είναι σε κοινή χρήση και αναφέρονται στις διαδικασίες μέτρησης και υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Ομαδοποίηση των ορισμών αυτών έχει δοθεί από τους Doorenbos και Pruitt(1977), Jensen et al. (1990) κ.α.

Εξάτμιση, E, είναι η φυσική διαδικασία με την οποία ένα στερεό ή υγρό σώμα μεταπίπτει στην αέρια φάση. Στις αρδεύσεις, η εξάτμιση περιορίζεται στη μεταβολή του νερού από τη υγρή στην αέρια φάση.

Δυναμική εξάτμιση, E_p , είναι η εξάτμιση από μια επιφάνεια όπου όλες οι επιφάνειες της με την ατμόσφαιρα είναι υγρές, έτσι που δεν υπάρχει κανένας περιορισμός της έντασης της εξάτμισης που να οφείλεται στην επιφάνεια. Το μέγεθος τη E_p εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις συνθήκες που επικρατούν στη ατμόσφαιρα και την ανακλαστικότητα της επιφάνειας, αλλά παραλλάσσει ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, όπως είναι η αεροδυναμική τραχύτητα.

Εξατμισοδιαπνοή, ET, είναι η συνδυασμένη διαδικασία με την οποία νερό μεταφέρεται προς την ατμόσφαιρα με την διαπνοή από τα φυτά και την εξάτμιση

από την επιφάνεια του εδάφους και την επιφάνεια των φύλλων, όταν είναι υγρά.

Δυναμική εξατμισοδιαπνοή, ET_p , είναι η ένταση (ρυθμός) με την οποία το νερό, κάτω από συνθήκες πλήρους διαθεσιμότητας, απομακρύνεται από το υγρό έδαφος και τις φυτικές επιφάνειες. Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή εκφράζεται είτε σαν ροή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $LETp$, είτε σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου.

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (ή βάσης), ET_r , είναι η ένταση με την οποία νερό, εφόσον είναι άμεσα διαθέσιμο, απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες μιας καλλιέργειας αναφοράς. Καλλιέργειες αναφοράς είναι ο χορτοτάπητας με ομοιόμορφο ύψος 8-15 cm ή η μηδική με μέσο ύψος 50 cm. Οι επιφάνειες των φύλλων της καλλιέργειας αναφοράς, τυπικά, δεν είναι υγρές. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ή, απλώς, **εξατμισοδιαπνοή αναφοράς**, εκφράζεται είτε σαν ροή λανθάνουσας θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας, $LETr$, είτε σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου.

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, ET_c , είναι η ένταση με την οποία νερό, εφόσον είναι άμεσα διαθέσιμο, απομακρύνεται από τις εδαφικές και φυτικές επιφάνειες μιας καλλιέργειας που αναπτύσσεται δυναμικά (είναι δηλαδή ελεύθερη από ασθένειες και οποιουσδήποτε άλλους παράγοντες ανασχετικούς της ανάπτυξης και έχει στη διάθεσή της όλα τα απαιτούμενα θρεπτικά συστατικά) και επιτυγχάνει το μέγιστο της ανάπτυξης και απόδοσης κάτω από τις επικρατούσες συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται. Η συνήθης έκφρασή της είναι σε ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου. Πολλές φορές η ET_c , αναφέρεται και σαν μέγιστη εξατμισοδιαπνοή, ET_{max} .

Πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, ET_a , είναι η ένταση με την οποία νερό απομακρύνεται από το έδαφος και τις φυτικές επιφάνειες της καλλιέργειας που αναπτύσσεται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ενός χωραφιού (πλήρης ή μερική διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων, προσβολή ή μη από ασθένειες κλπ.). Εκφράζεται σε ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού ανά μονάδα χρόνου. Είναι προφανές ότι $ET_a < ET_c$.

1.1.4 Μονάδες.

Το ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής εκφράζεται κυρίως σε mm ανά μονάδα

χρόνου. Το ποσοστό εκφράζει το ποσό του νερού που χάνεται από μια καλλιεργημένη έκταση σε μονάδες βάθους νερού. Η μονάδα χρόνου μπορεί να είναι ώρες, ημέρες, δεκαήμερο, μήνες, ή ακόμα μια ολόκληρη καλλιεργητική περίοδος ή χρόνος.

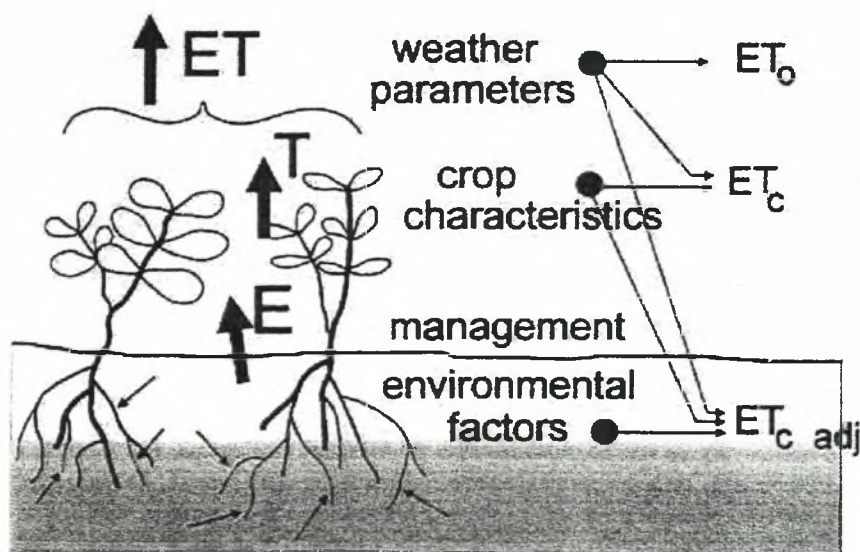
Καθώς ένα εκτάριο έχει επιφάνεια 10000 m^2 και 1 mm. αντιστοιχεί σε 0,001m, η απώλεια ενός mm νερού αντιστοιχεί σε απώλεια 10 κυβικών μέτρων/ εκτάριο. Με άλλα λόγια, 1mm/ημέρα αντιστοιχεί σε 10 κυβικά μέτρα / εκτάριο ή σε 1 m^3 / στρέμμα.

Τα βάθη του νερού μπορούν επίσης να εκφραστούν σε όρους λαμβανόμενης ενέργειας ανά μονάδα έκτασης. Με τον όρο ενέργεια αναφερόμαστε στην ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού. Η ενέργεια αυτή, που είναι επίσης γνωστή και σαν λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (λ), είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του νερού. Για παράδειγμα στους 20 βαθμούς Κέλσιου, το λ είναι περίπου 2,45 MJ/kg. Με άλλα λόγια, 2,45 MJ απαιτούνται για την εξάτμιση 1 kg νερού ή αλλιώς 1 mm νερού.

Ο βαθμός εξατμισοδιαπνοής που εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας, αντιπροσωπεύεται από το λET , την λανθάνουσα ροή θερμότητας.

1.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή μπορούν να διακριθούν στις κλιματικές παραμέτρους, στα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας, στην διαχείριση και από περιβαλλοντικής άποψης Σχήμα 1.1 , (Frevert, D.K., Hill, R.W. and Braaten, B.C., 1983).



1.2.1. Κλιματικές παράμετροι.

Οι κύριες κλιματικές παράμετροι που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου. Αρκετές διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί για την σωστή εκτίμηση του ποσοστού εξάτμισης από τις παραπάνω παραμέτρους. Η ικανότητα για ενέργεια εξάτμισης της ατμόσφαιρας εκφράζεται με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0) και εκφράζει την εξατμισοδιαπνοή από μια καθορισμένη φυτική επιφάνεια.

1.2.2. Παράγοντες καλλιέργειας.

Ο τύπος της καλλιέργειας, η ποικιλία και το στάδιο ανάπτυξης της είναι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν γίνεται εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σε φυτά που καλλιεργούνται σε μεγάλους και καλά οργανωμένους αγρούς. Διαφορές στην αντίσταση της διαπνοής, στο ύψος των φυτών, στην τραχύτητα τους στην αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, στην εδαφοκάλυψη καθώς και στα χαρακτηριστικά του ριζοστρώματος έχουν σαν αποτέλεσμα διαφορετικά επίπεδα τιμών της ET σε διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών κάτω από δεδομένες κλιματικές συνθήκες. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας κάτω από δεδομένες κλιματικές συνθήκες (ET_c) αναφέρεται στη ζήτηση της εξάτμισης από την καλλιέργεια η οποία αναπτύσσεται κάτω από άριστες συνθήκες εδαφικού νερού, καλή διαχείριση και περιβαλλοντικές συνθήκες, για την επίτευξη μέγιστης παραγωγής, κάτω από δεδομένες κλιματικές συνθήκες.

1.2.3. Περιβαλλοντικοί παράγοντες και παράγοντες διαχείρισης.

Παράγοντες όπως η αλατότητα του εδάφους, η φτωχή γονιμότητα του, η περιορισμένη εφαρμογή λιπασμάτων, η παρουσία σκληρών και αδιαπέραστων εδαφικών οριζόντων, η απουσία ελέγχου για ασθένειες και ζιζάνια και η φτωχή εδαφική διαχείριση μπορούν να περιορίσουν την ανάπτυξη μιας καλλιέργειας και να ελαττώσουν την εξατμισοδιαπνοή. Άλλοι παράγοντες που εξετάζουμε για τον υπολογισμό της ET είναι ο τύπος του εδάφους, η εδαφοκάλυψη, η πυκνότητα των φυτών της καλλιέργειας, και το ποσό του διαθέσιμου εδαφικού νερού. Η ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων εδαφικού νερού μπορεί να προκαλέσει τον κορεσμό του εδάφους με νερό με αποτέλεσμα την καταστροφή του ριζικού συστήματος και την περιορισμένη προσρόφηση του νερού με ταυτόχρονη αναστολή της αναπνοής.

1.3 ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ.

Υπάρχουν διαφορές μεταξύ της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o), της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας (ET_c) κάτω από μη κανονικές συνθήκες (ET_{adj}). Η ET_o είναι μια κλιματική παράμετρος η οποία εκφράζει την ικανότητα της ατμόσφαιρας για εξάτμιση. Η ET_o αναφέρεται στην εξατμισοδιαπνοή η οποία λαμβάνει χώρα σε μεγάλης έκτασης, καλά αρδευόμενους καλοδιαχειρισμένους αγρούς στους οποίους επιτυγχάνεται η μέγιστη παραγωγή, κάτω από τις δεδομένες καιρικές συνθήκες. Εξαιτίας όμως της μη άριστης διαχείρισης των αγρών και κάποιων άλλων περιβαλλοντικών παραμέτρων οι οποίες επηρεάζουν την ανάπτυξη και την αποδοτικότητα της καλλιέργειας, συνήθως η ET_o απαιτεί να γίνουν κάποιες διορθώσεις.

1.4 ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ET_o).

Ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής από μια επιφάνεια αναφοράς, στην οποία δεν παρατηρείται έλλειψη νερού, καλείται εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (reference crop evapotranspiration) και συμβολίζεται ET_o . Η επιφάνεια αναφοράς είναι συνήθως μια πρότυπη καλλιέργεια γρασιδιού με ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Η χρήση άλλων ορισμών, όπως "δυννητική εξατμισοδιαπνοή", δεν ενδείκνυται εξαιτίας των ασαφειών που περιέχουν. Η έννοια της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς εισήχθη για να μελετηθούν οι απαιτήσεις της ατμόσφαιρας για εξάτμιση ανεξαρτήτως του τύπου της καλλιέργειας, της ανάπτυξης της, καθώς και των πρακτικών διαχείρισης της. Όταν υπάρχει αφθονία νερού στην επιφάνεια του εδάφους, οι παράγοντες του εδάφους δεν επηρεάζουν την ET . Η συσχέτιση επομένως της ET με μια συγκεκριμένη επιφάνεια μπορεί να δώσει ένα μέγεθος αναφοράς έτσι ώστε να μπορεί να την συνδεθεί και με άλλες επιφάνειες. Εξάλλου είναι σαφής η ανάγκη καθορισμού διαφορετικών επιπέδων της ET για κάθε καλλιέργεια και για κάθε στάδιο ανάπτυξης της. Οι τιμές της ET_o που μετρούνται ή υπολογίζονται σε διαφορετικές περιοχές ή σε διαφορετικές καλλιεργητικές περιόδους είναι δυνατό να συγκριθούν καθώς και οι δύο αναφέρονται στην ET που έχει σαν σημείο αναφοράς την ίδια επιφάνεια. Οι μόνοι παράγοντες που επηρεάζουν την ET_o είναι οι κλιματικές παράμετροι. Συνεπώς η ET_o είναι μια κλιματική παράμετρος και είναι δυνατό να υπολογιστεί με την χρήση μετεωρολογικών δεδομένων. Η μέθοδος που προτείνεται για την μέτρηση της ET_o είναι η FAO Penman- Monteith (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999) η οποία είναι μία μοναδική μέθοδος για τον

προσδιορισμό της ET. Η μέθοδος αυτή προτείνεται γιατί δίνει αρκετά ακριβείς προβλέψεις και ενσωματώνει τόσο φυσιολογικές όσο και αεροδυναμικές παραμέτρους. Εξάλλου έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές και διαδικασίες για την εκτίμηση κλιματικών παραμέτρων για τις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις. (Κωτσόπουλος, Σ., και Μπαμπατζιμόπουλος, Χ., 1995).

1.5 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ (ET_o).

Η εξατμισοδιαπνοή κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ή πραγματική ET (ET_o) είναι η εξατμισοδιαπνοή σε μια καλοδιαχειρισμένη καλλιέργεια απαλλαγμένη από ασθένειες, η οποία καλλιεργείται σε μεγάλη έκταση κάτω από άριστες εδαφικές συνθήκες και με την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή παραγωγή κάτω από τις δεδομένες κλιματικές και καιρικές συνθήκες.

Το πόσο του νερού που απαιτείται για να αναπληρωθούν οι απώλειες εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής καθορίζεται σαν τις ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό. Παρόλο που οι δύο παραπάνω έννοιες είναι παρόμοιες, υπάρχει μια διάκριση: η εξατμισοδιαπνοή αναφέρεται στο ποσό του νερού το οποίο χάνεται, ενώ η έννοια "ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό" καθορίζει το νερό που θα πρέπει να προστεθεί για να αντισταθμιστούν αυτές τις απώλειες. Στην ουσία οι απαιτήσεις του αρδευτικού νερού είναι η διαφορά μεταξύ των αναγκών της καλλιέργειας σε άρδευση και της ωφέλιμης βροχοπτώσεως. Οι ανάγκες για άρδευση περιέχουν επίσης το νερό που απαιτείται για να ξεπλυθεί το έδαφος από τα άλατα.

Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να υπολογιστεί από κλιματολογικά δεδομένα και από τον συνυπολογισμό της αντίστασης της καλλιέργειας (συντελεστής ανακλαστικότητας) και παραγόντων της αντίστασης του αέρα στην προσέγγιση κατά Penman- Monteith. Καθώς υπάρχει ακόμη μια σημαντική έλλειψη πληροφοριών πάνω στον βαθμό εξατμισοδιαπνοής ορισμένων καλλιεργειών, η μέθοδος Penman- Monteith χρησιμοποιείται για καλλιέργειες αναφοράς. Πειραματικά καθορισμένα ποσοστά ET_c/ ET_o, καλούνται φυτικοί συντελεστές (K_c), και χρησιμοποιούνται, για την συσχέτιση μεταξύ της ET_c και της ET_o. Ισχύει $ET_c = K_c * ET_o$. Οι διαφορές στην ανατομία των φύλλων, τα χαρακτηριστικά των στομάτων, οι παράμετροι της αεροδυναμικής και ακόμα και ο συντελεστής ανακλαστικότητας προκαλούν την απόκλιση της τιμής της ET_o από εκείνη της ET_c κάτω από τις ίδιες κλιματικές συνθήκες. Εξαιτίας των αλλαγών των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας κατά την διάρκεια της ανάπτυξης

του φυτού, ο φυτικός συντελεστής K_c δεν παραμένει σταθερός, αλλά μεταβάλλεται από την σπορά έως και την συγκομιδή.

1.6 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΜΗ ΣΥΓΚΕΚΡΙΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ (ETc adj.).

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας κάτω από μη συγκεκριμένες συνθήκες είναι η εξατμισοδιαπνοή των φυτών τα οποία καλλιεργούνται κάτω από διαφορετική διαχείριση και κλιματικές συνθήκες διαφορετικές από τις κανονικές. Όταν καλλιεργούνται φυτά σε αγρούς, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή των φυτών μπορεί να διαφέρει από την ETc εξαιτίας κάποιων παραγόντων όπως η παρουσία εντόμων και ζιζανίων, η αλατότητα του νερού, η χαμηλή γονιμότητα των εδαφών και η έλλειψη ή η περίσσεια του εδαφικού νερού. Αυτό μπορεί να προκαλέσει την περιορισμένη ανάπτυξη των φυτών (μικρό μέγεθος και μικρή πυκνότητα της καλλιέργειας) και την μείωση το βαθμού της εξατμισοδιαπνοής κάτω από την ETc. Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας κάτω από μη συγκεκριμένες συνθήκες υπολογίζεται με την χρήση ενός συντελεστή (water stress coefficient) K_s ή με την ρύθμιση του K_c για όλα τα είδη των stress και των περιβαλλοντικών περιορισμών επάνω στην εξατμισοδιαπνοή. (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999).

1.7 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ.

1.7.1 Μέτρηση της ET.

Η εξατμισοδιαπνοή δεν είναι εύκολο να μετρηθεί. Για την μέτρηση της απαιτούνται ειδικές συσκευές και ακριβείς μετρήσεις ποικίλων φυσικών παραμέτρων ή του ισοζυγίου του εδαφικού νερού σε λυσίμετρα. Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί είναι δαπανηρές, απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις και μπορούν να εφαρμοστούν πλήρως μόνο από ένα άρτια εκπαιδευμένο προσωπικό. Παρόλο που οι παραπάνω μέθοδοι δεν είναι ενδεδειγμένες για μετρήσεις ρουτίνας, παραμένουν πολύ σημαντικές στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων μετρήσεων της εξατμισοδιαπνοής από άλλες έμμεσες μεθόδους.

1.7.2 Ισοζύγιο ενέργειας και μικροκλιματικές μέθοδοι.

Η εξάτμιση του νερού απαιτεί σχετικά μεγάλα ποσά ενεργείας, είτε υπό την μορφή της θερμότητας είτε υπό την μορφή της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως η διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής ελέγχεται από την ανταλλαγή ενέργειας στην φυτική επιφάνεια και περιορίζεται από το ποσό της διαθέσιμης ενέργειας. Εξαιτίας αυτού του περιορισμού, μπορεί να γίνει εκτίμηση της ET

εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Η ενέργεια που φτάνει στην φυλλική επιφάνεια πρέπει να είναι ίση με την ενέργεια που φεύγει από αυτή στο ίδιο χρονικό διάστημα. Επομένως η εξίσωση για την επιφάνεια της εξάτμισης μπορεί να γραφεί:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (1)$$

Όπου R_n είναι η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία., H είναι η αισθητή θερμότητα, G η κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας στο έδαφος και λET η λανθάνουσα ροή της θερμότητας. Οι παραπάνω όροι μπορεί να είναι είτε θετικοί είτε αρνητικοί. Θετική R_n παρέχει ενέργεια στην επιφάνεια και θετικά G , λET και H αφαιρούν ενέργεια από την επιφάνεια. Στην παραπάνω εξίσωση μόνο η κάθετες ενεργειακές ροές λαμβάνονται υπόψη και οι οριζόντιες ενεργειακές μεταφορές παραλείπονται. Επομένως η παραπάνω εξίσωση πρέπει να εφαρμόζεται μόνο σε μεγάλες κι εκτεταμένες επιφάνειες καλυμμένες από ομογενή βλάστηση. Η εξίσωση κάνει χρήση μόνο των τεσσάρων παραπάνω παραγόντων ενώ παράγοντες όπως η θερμότητα που εκλύεται ή αποθηκεύεται μέσα στο φυτό και χρησιμοποιείται για μεταβολικές δραστηριότητες δεν λαμβάνονται υπόψη καθώς αποτελούν μόνο ένα μικρό μέρος του καθημερινού ενεργειακού ισοζυγίου και επομένως θεωρούνται αμελητέοι. Η λανθάνουσα ροή θερμότητας αντιπροσωπεύει ποσοστό της ET και μπορεί να εξαχθεί μόνο από την εξίσωση του ισοζυγίου ενέργειας, εάν όλες οι άλλες συνιστώσες της εξίσωσης είναι γνωστές. Η R_n και η G μπορούν να μετρηθούν ή να εκτιμηθούν από κλιματικές παραμέτρους. Μετρήσεις της αισθητής θερμότητας είναι οπωσδήποτε σύνθετες και δεν μπορούν εύκολα να μετρηθούν. Η ακριβή μέτρηση της κλίσης (βαθμιαία μεταβολή) της θερμοκρασίας πάνω στην επιφάνεια.

Μια άλλη μέθοδος εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής είναι η μέθοδος της μεταφοράς της μάζας. Αυτή η προσέγγιση κάνει λόγο για την κάθετη κίνηση μικρών τμημάτων αέριων δινών πάνω από μια μεγάλη ομογενή μάζα. Αυτές οι δίνες μεταφέρουν τόσο ύλη (υδρατμοί) όσο και ενέργεια (θερμότητα, ορμή) από και προς την επιφάνεια εξάτμισης. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν σταθερές συνθήκες και ότι οι συντελεστές μεταφοράς των δινών για τους υδρατμούς είναι ανάλογοι προς τους αντίστοιχους συντελεστές για την θερμότητα και την ορμή δύναται να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή από την κάθετη βαθμωτή μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα και των υδρατμών μέσω του ποσοστού του Bowen. Άλλες απευθείας μέθοδοι μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιούν επίσης την βαθμωτή μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα και

των υδρατμών. Άμεσες μέθοδοι μέτρησης χρησιμοποιούν τη βαθμωτή μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου και των υδρατμών. Επομένως γίνεται αντιληπτό πως οι παραπάνω μέθοδοι απαιτούν ακριβείς μετρήσεις της πίεσης των υδρατμών, της θερμοκρασίας του αέρα και της ταχύτητας του ανέμου σε διαφορετικά επίπεδα πάνω από την επιφάνεια της εξάτμισης. Άρα, η εφαρμογή τους περιορίζεται μόνο σε ερευνητικό επίπεδο αρχικού σταδίου.

1.7.3 Ισοζύγιο του εδαφικού νερού.

Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί επίσης να προσδιορισθεί κάνοντας χρήση των ποικίλων παραμέτρων του ισοζυγίου του εδαφικού νερού. Η μέθοδος βασίζεται στην εκτίμηση της εισροής και της εκροής του εδαφικού νερού στην ζώνη του ριζοστρώματος κατά την ίδια χρονική περίοδο. Η άρδευση (I) και οι βροχοπτώσεις (P) προσθέτουν νερό στη ζώνη του ριζοστρώματος. Ένα μέρος του νερού των I και P μπορεί να χαθεί με την απορροή από την επιφάνεια του εδάφους (RO), ενώ ένα άλλο μέρος με την βαθιά διήθηση του (DP) που σταδιακά θα επαναφορτίσει τον υδροφόρο ορίζοντα. Το νερό μπορεί επίσης να μεταφερθεί προς τα ανώτερα εδαφικά στρώματα με τριχοειδή ανοδική κίνηση (CR) από ένα υποεπιφανειακό υδατικό ορίζοντα προς την ζώνη του ριζοστρώματος, η επίσης να μεταφερθεί οριζόντια με υποεπιφανειακή ροή εντός (SFin) ή εκτός (SFout) του ριζοστρώματος. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, εκτός από περιπτώσεις για επικλινείς περιοχές τα (SFin) και (SFout), είναι πολύ μικρά και μπορούν να αγνοηθούν. Η εξάτμιση του νερού από το έδαφος καθώς και διαπνοή των φυτών εξαντλούν νερό από το ριζόστρωμα. Επομένως, εάν όλες οι άλλες ροές, εκτός από την εξατμισοδιαπνοή, μπορούν να υπολογιστούν, η εξατμισοδιαπνοή είναι δυνατό να εκτιμηθεί από τις μεταβολές του περιεχομένου του εδαφικού νερού (ΔSW) μετά την πάροδο μιας χρονικής περιόδου με την σχέση:

$$ET = I + P - RO - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta SW \quad (2)$$

Ορισμένες ροές, όπως η υποεπιφανειακή, η βαθιά διήθηση και η τριχοειδής ανύψωση από μια υπόγεια στάθμη νερού είναι δύσκολο να υπολογιστούν και σε μικρά χρονικά διαστήματα. Η μέθοδος του ισοζυγίου του εδαφικού νερού μπορεί να δώσει εκτιμήσεις της ET μόνο για μακροχρόνιες περιόδους και όχι για περιόδους μιας εβδομάδας ή 10 ημερών.

1.7.4 Λυσίμετρα.

Απομονώνοντας την ζώνη του ριζοστρώματος του φυτού από το μικροπεριβάλλον του και ελέγχοντας τις διαδικασίες οι οποίες είναι δύσκολο να μετρηθούν, οι διάφοροι όροι (παράγοντες) της εξίσωσης του ισοζυγίου του νερού είναι δυνατό να καθοριστούν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Αυτό επιτυγχάνεται με τα λυσίμετρα όπου τα φυτά μεγαλώνουν απομονωμένα μέσα σε μεγάλες δεξαμενές οι οποίες περιέχουν διαταραγμένο ή αδιατάρακτο έδαφος. Συγκεκριμένα, στα ζυγιστικά λυσίμετρα, όπου η απώλεια νερού μετράται απευθείας από την αλλαγή του βάρους, λαμβάνονται μετρήσεις εξατμισοδιαπνοής με ακρίβεια μερικών εκατοντάδων του χιλιοστού, και βραχυχρόνιες περίοδοι (όπως ωριαίες) μπορούν να ληφθούν υπόψη στις μετρήσεις μας. Στα μη - ζυγιστικά λυσίμετρα η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται μετρώντας το νερό στράγγισης το οποίο συλλέγεται σε δοχεία στην βάση των λυσιμέτρων και στη συνέχεια αφαιρώντας το από την ολική εισροή του νερού.

Μια απαίτηση των λυσιμέτρων όμως είναι η βλάστηση τόσο εντός όσο κι εκτός του λυσιμέτρου να βρίσκεται στα ίδια επίπεδα (ίδιο ύψος και ίδιος δείκτης φυλλικής επιφάνειας L.A.I.). Αυτή η παράμετρος δεν είχε ληφθεί υπόψη στο παρελθόν κι έχουμε αρκετά παραδείγματα λανθασμένων και μη αντιπροσωπευτικών εκτιμήσεων της ET_c και του K_c .

Καθώς όμως τα λυσίμετρα είναι ακριβά στην κατασκευή και αφού η χρήση και συντήρηση τους απαιτεί ειδική φροντίδα, η χρήση τους είναι περιορισμένη μόνο για ειδικούς ερευνητικούς σκοπούς. (Παπαζαφειρίου, Ζ., 1991).

1.7.5 Μέτρηση της ET από μετεωρολογικά δεδομένα.

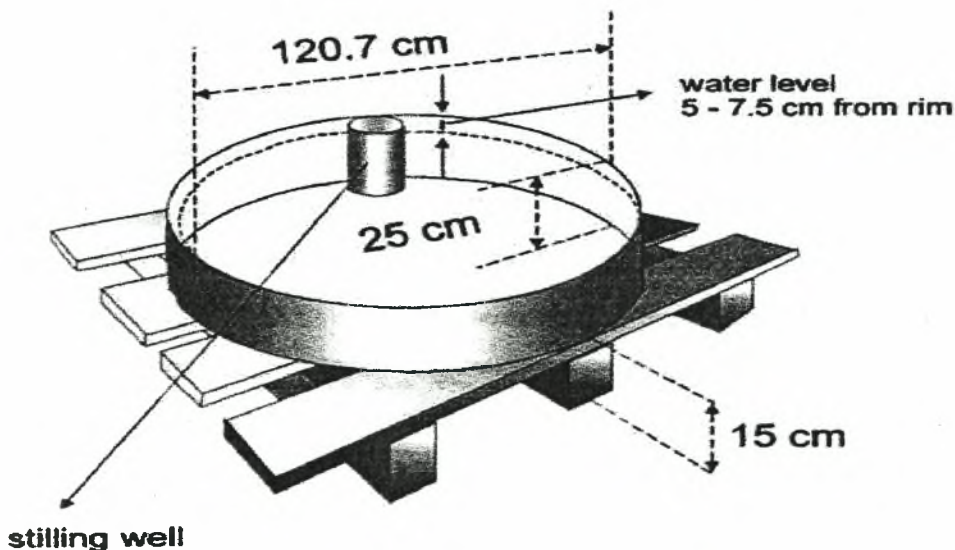
Εξαιτίας της δυσκολίας απόκτησης μετρήσεων μεγάλης ακρίβειας από τους αγρούς, η ET συχνά υπολογίζεται από μετεωρολογικά δεδομένα. Πολυάριθμες, εμπειρικές και ημιεμπειρικές εξισώσεις έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό. Κάποιες από τις παραπάνω μεθόδους ισχύουν μόνο κάτω από συγκεκριμένες κλιματικές και αγρονομικές συνθήκες και δεν μπορούν να εφαρμοστούν κάτω από συνθήκες διαφορετικές από αυτές για τις οποίες είχαν αρχικά αναπτυχθεί.

Πολυάριθμες έρευνες ανέλυσαν την εγκυρότητα αρκετών τέτοιων μεθόδων σε διαφορετικές περιοχές. Σαν αποτέλεσμα ενός Συμβουλίου εμπειρογνομών το οποίο έλαβε χώρα τον Μάιο του 1990, η μέθοδος FAO

Penman-Monteith προτείνεται πλέον σαν την μόνη αναγνωρισμένη μέθοδο εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_0 . Η εξατμισοδιαπνοή από τις επιφάνειες των καλλιεργειών κάτω από σταθερές συνθήκες ET_c καθορίζεται από τους φυτικούς συντελεστές οι οποίοι συσχετίζουν την ET_0 με την ET_c . Η ET κάτω από μη σταθερές συνθήκες ρυθμίζεται με την χρήση ενός συντελεστή $water\ stress\ (K)$ ή με την τροποποίηση του συντελεστή K_c .

1.7.6 Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από εξατμισίμετρο.

Η εξάτμιση από μια ελεύθερη επιφάνεια νερού παρέχει ένα δείκτη για την ολοκληρωμένη επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας και του ανέμου στην εξατμισοδιαπνοή. Παρόλα αυτά υπάρχουν σημαντικές διαφορές στην απώλεια του νερού από μια ελεύθερη επιφάνεια νερού και από την επιφάνεια μιας καλλιέργειας. Η πρακτική αξία του εξατμισιμέτρου και η επιτυχής χρήση του στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αποδείχτηκε με την παρατήρηση της απώλειας νερού μέσω της εξάτμισης από την ελεύθερη επιφάνεια και με την εφαρμογή εμπειρικών συντελεστών για την συσχέτιση της με την ET_0 . Τουλάχιστο 9 τύποι εξατμισιμέτρου χρησιμοποιούνται ανά τον κόσμο. Ο πιο διαδεδομένος από αυτούς είναι το εξατμισίμετρο τύπου A της U.S. Weather Service. Οι διαστάσεις του είναι: διάμετρος 120,7 εκ., βάθος 25,4 εκ, επίπεδο νερού 5 με 7,5 εκ. κάτω από το ελεύθερο άκρο του εξατμισιμέτρου.



Σχήμα 1.2. Εξατμισίμετρο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

Η ΕΞΙΣΩΣΗ Penman-Monteith

2.1 ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΥΠΑΡΞΗ ΜΙΑΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΤο.

Πολυάριθμες εμπειρικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία 50 χρόνια για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής από ένα μεγάλο αριθμό ειδικών κι επισημομένων σε διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες σ' ολόκληρο τον κόσμο. Πολλές σχέσεις έβρισκαν όμως εφαρμογή αυστηρώς σε τοπικές συνθήκες και απεδείχθη ότι είχαν περιορισμένη παγκόσμια ισχύ. Η δοκιμή των παραπάνω μεθόδων κάτω από διαφορετικές κάθε φορά συνθήκες είναι μια διαδικασία κουραστική, πολυδάπανη και χρονοβόρα και πολλές φορές η ύπαρξη δεδομένων εξατμισοδιαπνοής σε μικρό χρονικό διάστημα είναι αναγκαία για την κατασκευή σχεδίου άρδευσης. Γι' αυτό το σκοπό ο FAO δημοσίευσε μια εργασία στην οποία παρουσιάστηκαν 4 μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής ΕΤο: η σχέση Blaney-Criddle, η τροποποιημένη σχέση Penman-Monteith, η μέθοδος της ακτινοβολίας (radiation method) και η μέθοδος του εξατμισιμέτρου (Pan evaporation). Η τροποποιημένη μέθοδος Penman-Monteith έδειξε να προσφέρει τα πιο ακριβή αποτελέσματα με το ελάχιστο πιθανό σφάλμα σε σχέση με μια πρότυπη καλλιέργεια γρασιδιού (καλλιέργεια αναφοράς). Ήταν αναμενόμενο ότι η μέθοδος του εξατμισιμέτρου θα έδινε ακριβή αποτελέσματα εξαρτώμενα από την τοποθεσία του δοχείου. Η μέθοδος της ακτινοβολίας προτάθηκε για χρήση στις περιοχές εκείνες όπου υπήρχαν διαθέσιμα κλιματικά δεδομένα συμπεριλαμβανομένων και της θερμοκρασίας του αέρα, της ηλιοφάνειας, της συννεφιάς ή της ακτινοβολίας αλλά όχι της ταχύτητας του ανέμου και της σχετικής υγρασίας. Τελικά η μέθοδος των Blaney-Criddle προτάθηκε για περιοχές όπου θα υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα μόνο για την θερμοκρασία του αέρα. Οι 4 αυτές μέθοδοι ρυθμίστηκαν για μετρήσεις σε δεκαήμερες ή μηνιαίες περιόδους και όχι για μετρήσεις σε καθημερινή ή ωριαία βάση. Η μέθοδος Blaney-Criddle προτάθηκε για χρήση για μηνιαίες ή και μεγαλύτερες περιόδους. Για την μέθοδο του εξατμισιμέτρου υποστηρίχθηκε ότι η χρήση της θα πρέπει να γίνεται για περιόδους 10 ημερών ή και μεγαλύτερες. Η πρόοδος στην έρευνα και η περισσότερο ακριβής εικόνα για την χρήση του νερού μέσα στο φυτό απέδειξαν την αδυναμία σ' αυτές τις 4 μεθόδους. Πολυάριθμες έρευνες ανέλυσαν την ακρίβεια των παραπάνω

μεθόδων σε διαφορετικές τοποθεσίες. Παρόλο που εικάστηκε ότι τα αποτελέσματα μπορεί να είχαν επηρεαστεί από την τοποθεσία ή από τις συνθήκες μέτρησης ή ακόμα και από την μορφολογία της τοποθεσίας όπου γίνονται οι μετρήσεις, έγινε προφανής η αδυναμία τους να "συμπεριφερθούν" ανάλογα στις διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο. Οι αποκλίσεις μεταξύ υπολογισμένων και παρατηρούμενων τιμών συχνά υπερέβαιναν τα όρια για τα οποία καθορίστηκαν από τον FAO. Η τροποποιημένη μέθοδος του Penman συχνά βρέθηκε να υπερεκτιμά την ΕΤο, σε ποσοστά μέχρι και 20% παραπάνω από τις κανονικές, σε συνθήκες χαμηλής εξάτμισης. Οι άλλες 3 μέθοδοι έδειξαν μεταβλητή εμμονή σε σχέση με την καλλιέργεια αναφοράς του γρασιδιού.

Για να εκτιμηθούν οι δυνατότητες των παραπάνω καθώς και άλλων μεθόδων κάτω από διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες, μια μεγάλη μελέτη έλαβε χώρα υπό την αιγίδα της επιτροπής του ASCE (American Society of Civil Engineers). (Committee on Irrigation Water Requirements). Η μελέτη αυτή εξέτασε λεπτομερώς και διεξοδικά 20 διαφορετικές μεθόδους συγκρίνοντας τις με τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία λήφθηκαν από ένα προσεκτικά ρυθμισμένο λυσίμετρα, σε 11 τοποθεσίες με ποικίλες κλιματικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα της αποκαλυπτικής έρευνας απέδειξαν καθαρά τις μεγάλες διακυμάνσεις και αποκλίσεις των αποτελεσμάτων αυτών των μεθόδων κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Σε μια παράλληλη μελέτη που έγινε από την Ευρωπαϊκή Ένωση, μια σύναξη διαφόρων ευρωπαϊκών ινστιτούτων μελετήθηκε η χρήση διαφόρων μεθόδων μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής με δεδομένα τα οποία πάρθηκαν από διάφορα λυσίμετρα σ' ολόκληρη την Ευρώπη. Οι μελέτες αυτές επιβεβαίωσαν ότι η τροποποιημένη μέθοδος Penman υπερεκτιμά την εξατμισοδιαπνοή σε πολλές περιπτώσεις και ότι η σταθερότητα των άλλων 3 μεθόδων εξαρτάται από τις προσαρμοστικότητά τους στις διάφορες τοπικές συνθήκες. (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999) Γενικότερα οι μελέτες που έγιναν μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Η μέθοδος Penman πιθανόν να χρειάζεται τοπική βαθμονόμηση για την εξίσωση του ανέμου έτσι ώστε να μας δίνει περισσότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- Η μέθοδοι της ακτινοβολίας μας δίνουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα στα υγρά κλίματα όπου ο αεροδυναμικός όρος είναι σχετικά μικρός, αλλά σε ξηρές συνθήκες δίνουν λανθασμένες εκτιμήσεις και τείνουν να

υποεκτιμούν το ποσοστό της ΕΤο.

- Οι μέθοδοι της θερμοκρασίας παραμένουν εμπειρικές και χρειάζονται βαθμονόμηση σύμφωνα με τα τοπικά δεδομένα για να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μια πιθανή εξαίρεση ίσως να αποτελεί η μέθοδος του Hardgreaves (1985) η οποία έδωσε λογικά αποτελέσματα με παγκόσμια ισχύ.

- Οι μέθοδος μέτρησης της εξάτμισης από ένα εξατμισόμετρο αντανakλά την ανεπάρκεια μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής υπολογίζοντας μόνο την εξάτμιση του νερού από μια ελεύθερη επιφάνεια. Οι μέθοδος εξαρτάται πάρα πολύ από τις μικροκλιματικές συνθήκες και κάτω από τις οποίες βρίσκονται τα εξατμισόμετρα, καθώς και από την συντήρηση του σταθμού όπου γίνονται οι μετρήσεις. Η μέθοδος γενικότερα αποδεικνύεται λανθασμένη.

- Η σχετικά ακριβής και σταθερή απόδοση της τροποποιημένης μεθόδου Penman-Monteith τόσο σε υγρές όσο και σε ξηρές συνθήκες απεδείχθη τόσο στην μελέτη του ASCE όσο και στην Ευρωπαϊκή μελέτη.

Η παραπάνω μελέτη επομένως φανερώνει την ανάγκη ύπαρξης μιας πρότυπης μεθόδου εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής. Η FAO Penman-Monteith μέθοδος συνίσταται σαν η μόνη πρότυπη μέθοδος καθώς επέδειξε μεγάλη πιθανότητα σωστής εκτίμησης της ΕΤο σε μια ευρεία ακτίνα περιοχών και κλιμάτων και έχει έγκριση χρήσης και σε βραχυχρόνιες περιόδους, (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999)

2.2 ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ Penman-Monteith

Στα 1948, ο Penman συνδύασε το ισοζύγιο ενέργειας με την μέθοδο μεταφοράς της μάζας και ανέπτυξε μια εξίσωση για να υπολογίσει την εξάτμιση του νερού από μια ελεύθερη επιφάνεια κάτω από συγκεκριμένες κλιματολογικές συνθήκες (ηλιοφάνεια, θερμοκρασία, υγρασία και ταχύτητα του ανέμου). Αυτή η μέθοδος αποκαλείται "συνδυασμένη μέθοδος" αναπτύχθηκε από πολλούς ερευνητές και επεκτάθηκε και σε φυτικές επιφάνειες εισάγοντας παράλληλα κάποιους παράγοντες αντίστασης.

Οι παραπάνω παράγοντες διακρίνονται σε αεροδυναμικής αντίστασης και επιφανειακής αντίστασης παράγοντες. Οι παράγοντες της επιφανειακής αντίστασης συχνά συνδυάζονται σε μια, την παράμετρο "όγκος" η οποία δρα εν

σειρά με την αεροδυναμική αντίσταση. Η επιφανειακή αντίσταση, r_s , περιγράφει την αντίσταση της ροής των υδρατμών δια μέσου των στομάτων που είναι ανοιχτά, της συνολικής φυλλικής επιφάνειας και της επιφάνειας του εδάφους. Η αεροδυναμική αντίσταση r_a περιγράφει την αντίσταση από τα ανώτερα στρώματα της βλάστησης καθώς και την αντίσταση από τον αέρα ο οποίος κινείται πάνω από τις φυτικές επιφάνειες. Παρόλο που η διαδικασία ανταλλαγής πάνω από μια φυτική επιφάνεια είναι περίπλοκη για να περιγραφεί πλήρως μόνο από τους δύο παράγοντες, μπορούμε μόνο με τη χρήση τους να επιτύχουμε αρκετά καλές συσχετίσεις μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων ποσοστών εξατμισοδιαπνοής, ειδικά για μια ομοιόμορφη επιφάνεια αναφοράς (πρότυπη καλλιέργεια γρασιδιού).

Έτσι η εξίσωση Penman-Monteith παίρνει την παρακάτω μορφή:

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

Όπου: R_n είναι η καθαρή ακτινοβολία, G η κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας στο έδαφος, το $(e_s - e_a)$ αντιπροσωπεύει το έλλειμμα της πίεσης υδρατμών του αέρα, ρ_a είναι η μέση πυκνότητα του αέρα σε συνθήκες σταθερής πίεσης, c_p είναι η καθορισμένη θερμοκρασία του αέρα, το Δ αντιπροσωπεύει την κλίση της καμπύλης της τάσης ατμών, γ η ψυχομετρική σταθερά και τα r_s και r_a είναι οι παράμετροι της επιφανειακής και της αεροδυναμικής αντίστασης αντίστοιχα. (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999).

2.2.1 Αεροδυναμική αντίσταση (r_a)

Η μεταφορά θερμότητας και υδρατμών από την επιφάνεια εξάτμισης στον αέρα, πάνω από το φύλλωμα, καθορίζεται από την αεροδυναμική αντίσταση:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{0m}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{0h}} \right]}{k^2 u_z} \quad (2.2)$$

Όπου: r_a = η αεροδυναμική αντίσταση (s/m)

z_m = ύψος μέτρησης ανέμου (m)

z_h = ύψος μέτρησης υγρασίας (m)

d = μετατόπιση μηδενικού επιπέδου (m)

z_{om} = παράμετρος τραχύτητας της επιφάνειας για ζώσα δύναμη (m)

z_{oh} = ύψος τραχύτητας για μεταφορά υδρατμών (m)

k = σταθερά του Von Karman

u = ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει αυστηρά για συνθήκες ουδέτερης σταθερότητας, π.χ., σε συνθήκες όπου η θερμοκρασία, η ατμοσφαιρική πίεση και η ταχύτητα του ανέμου ακολουθούν σχεδόν τις αδιαβατικές συνθήκες (δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας). Η εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης για μικρά χρονικά διαστήματα μπορεί να απαιτεί την προσθήκη κάποιων συντελεστών διόρθωσης για περισσότερη σταθερότητα. Παρόλα αυτά, όταν υπολογίζεται η ΕΤο σε μια καλά αρδευόμενη επιφάνεια αναφοράς όπου η ανταλλαγή της θερμότητας είναι' σχεδόν μηδενική, συνήθως δεν χρειάζεται καμία διόρθωση.

Σε πολλές μελέτες ερευνήθηκε η φύση της επίδρασης του ανέμου στην φυλλική επιφάνεια. Μηδενικά ύψη αντικατάστασης και μήκη τραχύτητας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν η επιφάνεια είναι καλυμμένη από βλάστηση. Οι παράγοντες εξαρτώνται από το ύψος και την αρχιτεκτονική της καλλιέργειας. Αρκετές εμπειρικές εξισώσεις αναπτύχθηκαν για τον υπολογισμό των d , Z_{om} , Z_{oh} .

2.2.2 Επιφανειακή αντίσταση (r_s)

Η επιφανειακή αντίσταση περιγράφει την αντίσταση της ροής των υδρατμών δια μέσου της διαπνεούσας φυτικής επιφάνειας και της εξατμίζουσας εδαφικής επιφάνειας. Σε περιπτώσεις όπου δεν υφίσταται πλήρη εδαφοκάλυψη από την φυλλική επιφάνεια, ο παράγοντας της αντίστασης πρέπει να συμπεριλαμβάνει και την επίδραση της εξατμίσης από την εδαφική επιφάνεια. Εξάλλου εάν η διαπνοή δεν γίνεται στα κανονικά επίπεδα, η αντίσταση εξαρτάται επίσης από την υδατική κατάσταση του φυτού. Μια αποδεκτή προσέγγιση μιας αρκετά περίπλοκης σχέσης της επιφανειακής αντίστασης μιας καλλιέργειας που παρέχει πλήρη κάλυψη είναι η εξής:

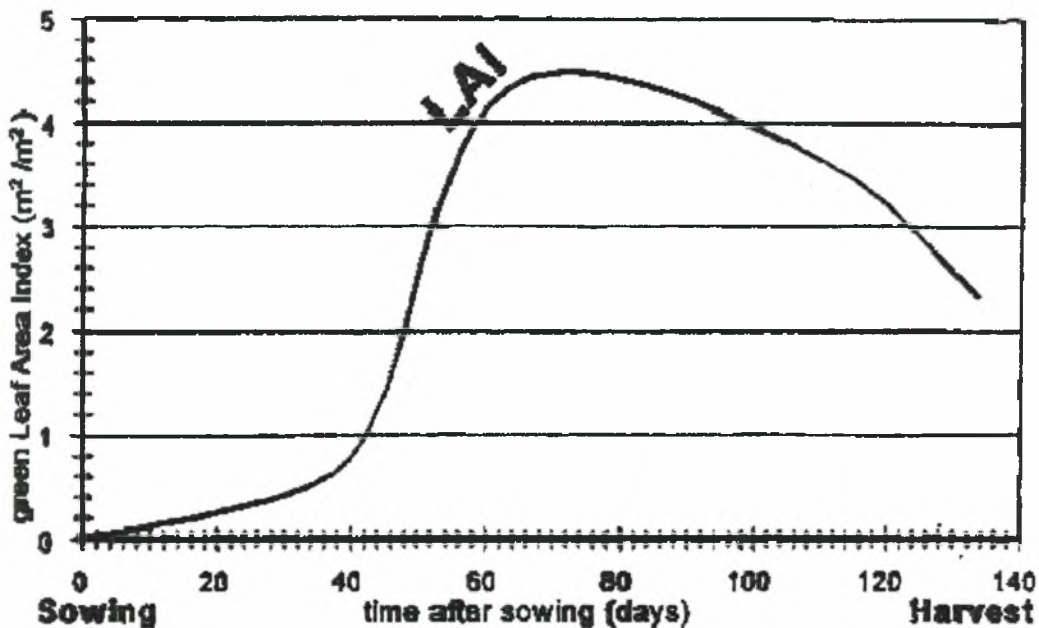
$$r_s = \frac{r_i}{LAI_{active}} \quad (2.3)$$

Όπου: r_s = επιφανειακή αντίσταση (s/m)

r_i = στοματική αντίσταση της καλά φωτιζόμενης επιφάνειας (s/m)

LAI_{active} = ενεργός δείκτης φυλλικής επιφάνειας [m^2 (φυλλική επιφάνεια) m^2 (εδαφική επιφάνεια)].

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας, μια αδιάστατη μεταβλητή, είναι η φυλλική επιφάνεια (μόνο η επάνω πλευρά των φύλλων) ανά μονάδα εδαφικής επιφάνειας. Εκφράζεται σε m^2 , φυλλικής επιφάνειας ανά m^2 εδαφικής επιφάνειας. Ο ενεργός LAI είναι ο δείκτης της φυλλικής επιφάνειας που συνεισφέρει ενεργά στην επιφανειακή θερμότητα και στην μεταφορά υδρατμών. Είναι συνήθως η ανώτερη ηλιόλουστη επιφάνεια μιας πυκνής φυλλοκάλυψης. Οι τιμές LAI για διαφορετικές καλλιέργειες διαφέρουν αρκετά αλλά συνήθως στις περισσότερο ώριμες καλλιέργειες κυμαίνεται από 3 έως 5. Για μια δεδομένη καλλιέργεια, ο LAI μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και φθάνει στη μέγιστη τιμή του λίγο πριν την περίοδο άνθησης.



Σχήμα 2.1 Χαρακτηριστική παρουσίαση της παραλλαγής του ενεργού (πράσινου) δείκτη φυλλικής επιφάνειας κατά τη διάρκεια της περιόδου ταχείας ανάπτυξης για καλλιέργεια αραβόσιτου.

Η στοματική αντίσταση r_s , είναι η μέση αντίσταση ενός ξεχωριστού φύλλου. Αυτή η αντίσταση είναι συγκεκριμένη για κάθε καλλιέργεια και διαφέρει ανάλογα με την ποικιλία και τον τρόπο διαχείρισης. Συνήθως αυξάνει καθώς το φυτό μεγαλώνει και αρχίζει να ωριμάζει. Υπάρχει όμως, μια έλλειψη διασταυρωμένων και συνδυασμένων πληροφοριών όσον αφορά την μεταβολή της r_s στις διάφορες καλλιέργειες με την πάροδο του χρόνου. Οι πληροφορίες που υπάρχουν διαθέσιμες στην βιβλιογραφία επάνω στην στοματική δράση ή αντίσταση χρησιμοποιούνται κυρίως φυσιολογικές ή οικοφυσιολογικές μελέτες.

Η στοματική αντίσταση r_s , επηρεάζεται από το κλίμα και από την διαθεσιμότητα του νερού. Όμως οι επιδράσεις των παραπάνω παραγόντων διαφέρουν από καλλιέργεια σε καλλιέργεια ή ακόμη από ποικιλία σε ποικιλία. Η αντίσταση μεγαλώνει όταν η καλλιέργεια δοκιμάζεται από έλλειψη νερού και η διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού περιορίζει την εξατμισοδιαπνοή. Ορισμένες μελέτες έδειξαν ότι η στοματική αντίσταση επηρεάζεται σ' ένα βαθμό από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, από την θερμοκρασία και από το έλλειμμα της τάσης υδρατμών.

2.3 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Η έννοια της επιφάνειας αναφοράς (reference surface) εισήχθη για να καλυφθεί η ανάγκη καθορισμού ενιαίων παραμέτρων εξάτμισης για κάθε καλλιέργεια και κάθε στάδιο ανάπτυξης της. Τα ποσοστά εξατμισοδιαπνοής των διαφόρων καλλιεργειών (ET_c) συνδέονται με το ποσοστό εξατμισοδιαπνοής της επιφάνειας (ET_o) αναφοράς με την χρήση φυτικών συντελεστών (K_c).

Στο παρελθόν σαν επιφάνεια αναφοράς χρησιμοποιήθηκε μια ελεύθερη επιφάνεια νερού. Όμως οι διαφορές στην αεροδυναμική, στον φυτικό έλεγχο και στα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας προέβαλαν μεγάλες δυσκολίες την προσπάθεια συσχέτισης των μετρήσεων της ET και της εξάτμισης του νερού από μια ελεύθερη επιφάνεια. Η συσχέτιση της ET_o με μια συγκεκριμένη καλλιέργεια έχει το πλεονέκτημα της ενσωμάτωσης των βιολογικών και των φυσιολογικών διαδικασιών του φυτού μέσα στο φαινόμενο.

Το γρασίδι, μαζί με τη μηδική (alfa-alfa), είναι μια πολύ καλά μελετημένη καλλιέργεια όσον αφορά την αεροδυναμική του και τα επιφανειακά του χαρακτηριστικά και γίνεται παγκοσμίως αποδεκτό σαν επιφάνεια αναφοράς. Επειδή η αντίσταση στην διάχυση των υδρατμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από

το ύψος της καλλιέργειας, την εδαφοκάλυψη, τον LAI και τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας, τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας αναφοράς θα πρέπει να είναι σαφώς προσδιορισμένα και καθορισμένα. Τυχόν αλλαγές στο ύψος του φυτού έχουν σαν αποτέλεσμα μεταβολές της τραχύτητας και του LAI. Συνεπώς, η φυλλοσκίαση και οι αεροδυναμικές αντιστάσεις θα μεταβάλλονται αισθητά σύμφωνα με το χρόνο. Επιπλέον το στρεσάρισμα από την έλλειψη νερού καθώς και το ποσοστό εδαφοκάλυψης έχουν επίδραση στις αντιστάσεις και στον συντελεστή ανακλαστικότητας. Προς αποφυγή προβλημάτων τοπικής ρύθμισης (διόρθωσης) τα οποία θα απαιτούσαν επίπονες, χρονοβόρες και πολυδάπανες μελέτες, επιλέχθηκε μια υποθετική καλλιέργεια αναφοράς, αυτή του γρασιδιού. Οι δυσκολίες που μπορεί να προκύψουν στην λήψη και στην εκτίμηση αποτελεσμάτων από την συγκεκριμένη καλλιέργεια απορρέουν από το γεγονός ότι η ποικιλία και η μορφολογία της είναι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το ποσοστό εξατμισοδιαπνοής, ιδιαίτερα κατά την περίοδο της μέγιστης κατανάλωσης νερού από το φυτό. Μεγάλες διαφορές εντοπίζονται μεταξύ των ποικιλιών θερμών εποχών και αυτών των ψυχρών εποχών. Τα τελευταία έχουν χαμηλότερο βαθμό στοματικού ελέγχου και επομένως μεγαλύτερο ποσοστό εξατμισοδιαπνοής. Ίσως να είναι αρκετά δύσκολο επομένως να καλλιεργήσουμε τέτοιου τύπου γρασίδι σε ξηρά και τροπικά κλίματα.

Το Συμβούλιο Εμπειρογνομόνων του FAO συνεδριάζοντας πάνω σε θέματα επανεξέτασης των μεθοδολογιών για την εκτίμηση των αναγκών μιας καλλιέργειας σε νερό απεδέχθη την ακόλουθη σαφή διατύπωση για την επιφάνεια αναφοράς:

"Επιφάνεια αναφοράς είναι μια υποθετική καλλιέργεια αναφοράς με εκτιμώμενο ύψος περί τα 0,12 μέτρα, μια συγκεκριμένη επιφανειακή αντίσταση 70 s/m και συντελεστή ανακλαστικότητας 0,23 "

Τα κριτήρια της παραπάνω επιφάνειας αναφοράς ταιριάζουν μ' αυτά μιας εκτατικής καλλιέργειας πράσινου γρασιδιού, ενιαίου ύψους, που παρέχει 100% εδαφοκάλυψη και έχει επάρκεια νερού. Οι απαιτήσεις ότι όλες οι καλλιέργειες πρέπει να είναι μεγάλης επιφάνειας και ενιαίου ύψους απορρέουν από το γεγονός ότι όλες οι ροές είναι μονοδιάστατες με ανοδική κατεύθυνση.

Η μέθοδος FAO Penman-Monteith επιλέχθηκε σαν την μέθοδο με την οποία η εξατμισοδιαπνοή από αυτή την επιφάνεια αναφοράς ETo μπορεί να καθοριστεί σαφώς και σαν την μέθοδο η οποία παρέχει σταθερές τιμές ETo σε

όλες τις περιοχές και σε όλα τα κλίματα.

2.4 Η ΕΞΙΣΩΣΗ FAO Penman-Monteith

2.4.1 Εξίσωση

Η μέθοδος FAO Penman-Monteith αναπτύχθηκε μετά τον καθορισμό της πρότυπης καλλιέργειας αναφοράς σαν μια καλλιέργεια με ύψος γύρω στα 12 cm, επιφανειακή αντίσταση ίση με 70 s/m, και συντελεστή ανακλαστικότητας 0.23, καλλιέργεια που μοιάζει πολύ με αυτή του γρασιδιού ενιαίου ύψους, καλλιεργούμενου σε μεγάλη έκταση με επάρκεια νερού. Η νέα αυτή μέθοδος ξεπερνά τα προβλήματα και τις ατέλειες τις προηγούμενης FAO Penman μεθόδου και παρέχει περισσότερο ακριβή αποτελέσματα κάνοντας χρήση δεδομένων από όλο τον κόσμο. Από την αρχική εξίσωση Penman-Monteith και από τις εξισώσεις της επιφανειακής και της αεροδυναμικής αντίστασης προκύπτει η παρακάτω εξίσωση εκτίμησης της ΕΤο:

$$E T o = \frac{0.408 (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (2.4)$$

Όπου: ΕΤο= εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (mm/ημέρα)

R_n = καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (σε $MJm^{-2}day^{-1}$)

G = κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας στο έδαφος
(σε $MJm^{-2}day^{-1}$)

T = μέση θερμοκρασία (σε $^{\circ}C$)

u_2 = ταχύτητα του αέρα σε ύψος 2m (σε m/sec)

e_s = πίεση κορεσμού των υδρατμών (σε KPa)

e_a = πραγματική πίεση υδρατμών (σε KPa)

$e_s - e_a$ = επίδραση της υγρασίας της ατμόσφαιρας (σε KPa)

γ = ψυχομετρική σταθερά (σε $KPa/^{\circ}C$)

Δ = κλίση της γραμμής στη σχέση πίεση κορεσμού υδρατμών - θερμοκρασία (σε $KPa/^{\circ}C$)

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, ETo , παρέχει ένα στάνταρ βάση του οποίου:

Η ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΠΟΥ ΜΕΤΡΑΤΑΙ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΔΟΥΣ Η ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΙΝΑΙ ΔΥΝΑΤΟ ΝΑ ΣΥΓΚΡΙΘΕΙ.

Η ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΜΙΑΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΤΕΙ ΜΕ ΑΥΤΗ ΑΛΛΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ.

Η εξίσωση κάνει χρήση πρότυπων κλιματολογικών μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας (ηλιοφάνεια), θερμοκρασίας του αέρα, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας του ανέμου. Για την διασφάλιση της ακεραιότητας στους υπολογισμούς μας, οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε ύψος 2 μ (ή εφόσον γίνονται σε άλλο ύψος, να μετατρέπονται στο ύψος των 2 μέτρων) από μια εκτεταμένη επιφάνεια καλλιέργειας γρασιδιού, η οποία καλύπτει το έδαφος και έχει επάρκεια νερού.

Καμία εξίσωση που εκτιμά την εξατμισοδιαπνοή και βασίζεται σε καιρικές παραμέτρους δεν μπορεί να υπολογίσει πλήρως την εξατμισοδιαπνοή κάτω από οποιεσδήποτε κλιματικές συνθήκες εξαιτίας της απλοποίησης στην μορφοποίηση της και των λανθασμένων μετρήσεων. Είναι πιθανό μετρήσεις οι οποίες γίνονται με όργανα ακριβείας κάτω από άριστες κλιματικές και βιολογικές συνθήκες να δείξουν αποκλίσεις στους υπολογισμούς της εξατμισοδιαπνοής με την εξίσωση Penman-Monteith. Παρόλα αυτά έχει συμφωνηθεί να γίνεται χρήση του ορισμού της υποθετικής επιφάνειας αναφοράς (γρασίδι) της εξίσωσης Penman-Monteith όταν καθορίζονται ή εκφράζονται οι φυτικοί συντελεστές.

Είναι σημαντικό, όταν γίνεται σύγκριση της εξίσωσης FAO Penman-Monteith με μετρήσεις ETo , να χρησιμοποιούνται τόσο η πλήρης εξίσωση Penman-Monteith όσο και οι εξισώσεις για τις αντιστάσεις r_a και r_s , για να διασφαλισθεί ο υπολογισμός τυχόν αποκλίσεων που μπορεί να υπάρχουν στις μετρήσεις της ETo λόγω διαφοροποιήσεων στο ύψος του γρασιδιού. Αποκλίσεις στην μέτρηση του ύψους μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες αποκλίσεις των LAI , d και του z_{om} και επομένως να δώσει λανθασμένη εκτίμηση για την εξατμισοδιαπνοή. Όταν γίνεται εκτίμηση των αποτελεσμάτων, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τοπικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες καθώς και η διαχείριση (επάρκεια νερού, συχνότητα ποτίσματος), επηρεάζουν επίσης τις παρατηρήσεις της ETo . Η εξίσωση FAO Penman-Monteith είναι μια απλή προσεγγιστική αναπαράσταση των

φυσικών και φυσιολογικών παραγόντων που εμπλέκονται στην διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής. Κάνοντας κάποιος χρήση της παραπάνω εξίσωσης μπορεί να υπολογίσει τους φυτικούς συντελεστές ορισμένων καλλιεργειών (σε ερευνητικό επίπεδο), απλά συσχετίζοντας τις τιμές που μετρώνται (ET_c) με εκείνες που υπολογίζονται από την εξίσωση (ET_o). Στην προσέγγιση του φυτικού συντελεστή, πρέπει να συνυπολογίσουμε τις διαφορές στη φυλλική επιφάνεια και στην αεροδυναμική αντίσταση των διαφόρων καλλιεργειών σε σχέση με την καλλιέργεια αναφοράς. Ο φυτικός συντελεστής K_c αποτελεί ουσιαστικά ένα σύνολο των φυσικών και των φυσιολογικών διαφορών μεταξύ των διαφόρων καλλιεργειών και της καλλιέργειας αναφοράς. (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999)

2.4.2 Δεδομένα

Εκτός από την τοποθεσία (γεωγραφικό πλάτος) της καλλιέργειας, για να υπολογιστεί η εξατμισοδιαπνοή με την εξίσωση FAO Penman-Monteith, είναι απαραίτητα δεδομένα για την θερμοκρασία του αέρα, την υγρασία, την ηλιακή ακτινοβολία και την ταχύτητα του ανέμου για υμερήσιους, εβδομαδιαίους, δεκαήμερους ή μηνιαίους υπολογισμούς. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιούνται οι σωστές μονάδες για τα μετεωρολογικά δεδομένα της εξίσωσης.

2.4.3 Τοποθεσία

Πρέπει να καθορίζονται το ύψος (m) επάνω από την επιφάνεια της θάλασσας καθώς και το γεωγραφικό πλάτος (μοίρες βόρεια ή νότια) της καλλιέργειας. Αυτά τα δεδομένα χρειάζονται για την ρύθμιση κάποιων κλιματικών παραμέτρων σύμφωνα με την τοπική μέση τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης (μια εξίσωση για την υψομετρική απόσταση της καλλιέργειας πάνω από το ύψος της θάλασσας) και για τον υπολογισμό της εξωγήινης ακτινοβολίας (R_a) και, σε κάποιες περιπτώσεις, τις ώρες ηλιοφάνειας (N). Στις διαδικασίες υπολογισμού των R_a και N , το γεωγραφικό πλάτος εκφράζεται σε ακτίνια. Θετικές τιμές χρησιμοποιούνται για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο.

2.4.4 Θερμοκρασία

Απαιτούνται καθημερινά οι ελάχιστες και οι μέγιστες θερμοκρασίες του αέρα σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}C$). Όταν μόνο οι μέσες ημερήσιες

θερμοκρασίες είναι διαθέσιμες, οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν ακόμη αλλά με κάποια υποτίμηση της ET_0 εξαιτίας της μη γραμμικότητας της σχέσης πίεση κορεσμού υδρατμών - θερμοκρασία. Χρησιμοποιώντας την μέση θερμοκρασία αέρα αντί για την ελάχιστη και την μέγιστη μας δίνει χαμηλότερη τιμή της πίεσης κορεσμού των υδρατμών e_s και επομένως και μικρότερη τιμή ($e_s - e_a$) άρα και μικρότερη εκτίμηση της ET_0 .

2.4.5 Υγρασία

Απαιτείται η μέση ημερήσια τάση των υδρατμών, e_a , σε kilopascals (kPa). Η μέση ημερήσια τάση ατμών, όπου δεν είναι διαθέσιμη, μπορεί να υπολογιστεί από την μέγιστη και την ελάχιστη σχετική υγρασία (%), από τα ψυχομετρικά δεδομένα (θερμοκρασίες ξηρού και υγρού βολβού σε °C) ή dew point θερμοκρασία (°C).

2.4.6 Ακτινοβολία

Απαιτείται η μέση ημερήσια καθαρή ηλιακή ακτινοβολία σε megajoules ανά m^2 , ανά ημέρα ($MJm^{-2}day^{-1}$). Αυτά τα στοιχεία συνήθως δεν είναι διαθέσιμα αλλά μπορούν να υπολογιστούν από την μέση ακτινοβολία μικρού μήκους η οποία μετράται μ' ένα πυρανόμετρο ή από την μέση πραγματική ηλιοφάνεια (ώρες /ημέρα) μετρημένη μ' ένα καταγραφέα ηλιοφάνειας (Campbell Stokes).

2.4.7 Ταχύτητα ανέμου

Απαιτείται η μέση ημερήσια ταχύτητα του ανέμου σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec) μετρημένη σε ύψος 2 μέτρων πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Είναι πολύ σημαντικό να καθορίσουμε το ύψος στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις καθώς οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου αλλάζουν ανάλογα με το ύψος.

2.4.8 Κλιματικά δεδομένα που λείπουν

Μπορεί να προκύψουν περιπτώσεις που λείπουν κάποιες κλιματικές παράμετροι. Η χρήση μιας εναλλακτικής διαδικασίας υπολογισμού της ET_0 , η οποία απαιτεί περιορισμένα μετεωρολογικά δεδομένα, θα πρέπει γενικά να αποφεύγεται. Συνιστάται μόνο η χρήση της εξίσωσης FAO Penman-Monteith αφού λυθούν τα προβλήματα με τα δεδομένα τα οποία λείπουν. Οι διαφορές μεταξύ τιμών της ET_0 οι οποίες υπολογίζονται με τη χρήση της εξίσωσης FAO Penman-Monteith με ελλιπή δεδομένα, από την μια πλευρά και με πλήρη δεδομένα, από την άλλη, αναμένεται να είναι μικρότερες ή ίδιας τάξης από τις

διαφορές που προκύπτουν με την χρήση μιας άλλης διαδικασίας εκτίμησης της ET_o .

Ακόμη και όταν τα δεδομένα που υπάρχουν περιορίζονται μόνο στην ύπαρξη μέγιστων και ελάχιστων τιμών θερμοκρασίας του αέρα, είναι επίσης πιθανό να προκύψουν λογικές εκτιμήσεις της ET_o με την εξίσωση FAO Penman-Monteith. Τα δεδομένα υγρασίας μπορούν επίσης να εκτιμηθούν από τα ελάχιστα της θερμοκρασίας του αέρος ή μπορούν να παρθούν από ένα κοντινό μετεωρολογικό σταθμό μαζί μ' εκείνα της θερμοκρασίας του αέρος. Τέλος μετά την εκτίμηση της καταλληλότητας αυτών των μετρήσεων, ακολουθεί η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής.

Οι διαδικασίες εκτίμησης δεδομένων που λείπουν πρέπει να γίνονται σε τοπικό επίπεδο. Αυτό μπορεί να γίνει με την σύγκριση εκτιμήσεων εξατμισοδιαπνοής οι οποίες γίνονται με την μέθοδο Penman-Monteith με την ύπαρξη όλων των απαιτούμενων δεδομένων, με εκείνες τις εκτιμήσεις που γίνονται με ελλιπή δεδομένα. Ο λόγος πρέπει να είναι κοντά στο 1. Όταν ο λόγος των παραπάνω εκτιμήσεων διαφέρει σημαντικά από το 1, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν διορθωτικός παράγοντας για εκτιμήσεις οι οποίες γίνονται με ελλιπή δεδομένα. Όταν το σφάλμα ξεπερνά το 20% της τιμής της ET_o , τότε θα πρέπει να γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας για να καθοριστούν οι λόγοι (και τα όρια) σφάλματος για την χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Μια συνολική εκτίμηση πρέπει να γίνεται κάθε μήνα για κάθε μεταβλητή τόσο για τις καθημερινές όσο και για τις ημερήσιες όσο και για τις μηνιαίες μετρήσεις.

2.5 ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Για τον προσδιορισμό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς (Doorenbos and Pruitt, 1977, Allen, *et al.* 1998, Αλεξίου και Παπαμιχαήλ 1996) χρησιμοποιείται η τροποποιημένη μέθοδος Penman-Monteith όπως αυτή περιγράφεται στο FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (2.5)$$

όπου ET_o η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (mm/d), R_n η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G η ροή θερμότητας στο έδαφος ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) που για ημερήσια χρονικά διαστήματα μπορεί να θεωρηθεί $G \approx 0$, T η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2m ($^{\circ}\text{C}$), u_2 η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m (m s^{-1}), e_s πίεση κορεσμένων υδρατμών (kPa), e_a πραγματική πίεση υδρατμών (kPa), $e_s - e_a$ έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa), Δ κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία T ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) και γ ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Όλες οι παράμετροι στην εξ. (2.5) πρέπει να είναι γνωστές (μετρημένες) ή να υπολογιστούν από προσεγγιστικές εξισώσεις.

Οι παράμετροι e_s και Δ εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του αέρα (T) και για τον υπολογισμό τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες εξισώσεις (Allen *et al.*, 1998) :

$$e_s(T) = 0.6108 \cdot e^{\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right)} \quad (\text{kPa}) \quad (2.6)$$

$$\Delta(T) = \frac{4098}{(T + 237.3)^2} \cdot e_s \quad (\text{kPa}/^{\circ}\text{C}) \quad (2.7)$$

όπου T η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα ($^{\circ}\text{C}$) σε ύψος 2m από την επιφάνεια του εδάφους.

Εναλλακτικά για τα e_s και Δ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι εξισώσεις (Kotsopoulos and Babajimopoulos, 1997) :

$$e_s(T) = 0.61051 \cdot e^{\left(\frac{18.0788 \cdot T - 0.00254 \cdot T^2}{248.57 + T}\right)} \quad (\text{kPa}) \quad (2.6\alpha)$$

$$\Delta(T) = e_s \cdot \left(\frac{4650.79}{(T + 248.57)^2} - 0.00254 \right) \text{ (kPa/}^\circ\text{C)} \quad (2.7\alpha)$$

Για τις απαιτήσεις της εξ. (2.5) ως e_s χρησιμοποιείται η μέση τιμή που προκύπτει για τις θερμοκρασίες T_{max} και T_{min} και οι οποίες αναφέρονται σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο (ημέρα, εβδομάδα, δεκαήμερο, μήνα) :

$$e_s = \frac{e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})}{2} \text{ (kPa)} \quad (2.8)$$

ενώ στην εξ.(2.7) χρησιμοποιείται η μέση θερμοκρασία του αέρα (T_{mean} , $^\circ\text{C}$) που μπορεί να υπολογιστεί και ως :

$$T_{mean} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2.9)$$

Η πραγματική πίεση υδρατμών e_a (kPa), υπολογίζεται από την πίεση των πίεση κορεσμένων υδρατμών e_s και την σχετική υγρασία του αέρα RH (%)

$$\text{ως : } e_a = e_s \frac{RH}{100} \quad (2.10)$$

Στην εξ.(2.5) η παράμετρος e_a μπορεί να υπολογιστεί εφόσον υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία μέγιστης και ελάχιστης σχετικής υγρασίας (RH_{max} , RH_{min}) ως :

$$e_a = \frac{e_s(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100} + e_s(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100}}{2} \quad (2.11)$$

ενώ αν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία μέσης σχετικής υγρασίας (RH_{mean}) ως :

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} \left[\frac{e_s(T_{max}) + e_s(T_{min})}{2} \right] \quad (2.12)$$

Η ψυχομετρική σταθερά γ (kPa/°C) υπολογίζεται ως :

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{\lambda \cdot \varepsilon} = 0.00163 \cdot \frac{P}{\lambda} \quad (2.13)$$

όπου C_p ειδική θερμότητα υγρού αέρα (=1.013 kJ kg⁻¹ °C⁻¹)

P : ατμοσφαιρική πίεση (kPa),

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 \cdot z}{293} \right)^{5.26}, \quad z \text{ (m) υψόμετρο} \quad (2.14)$$

ε : λόγος μοριακού βάρους υδρατμών προς μοριακό βάρος ξηρού

αέρα = 0.622

λ : λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (MJ kg⁻¹)

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \cdot 10^{-3}) \cdot T, \quad T \text{ σε } ^\circ\text{C} \quad (2.15)$$

Εναλλακτικά για το λ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η εξίσωση (Κωτσόπουλος και Μπαμπατζιμόπουλος, 1995) :

$$\lambda = 2.501 - (2.378 \cdot 10^{-3}) \cdot T, \quad T \text{ σε } ^\circ\text{C} \quad (2.15\alpha)$$

Η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία, R_n , ισούται με τη διαφορά της εισερχόμενης καθαρής ακτινοβολίας μικρού μήκους (R_{ns}) και της εξερχόμενης καθαρής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.16)$$

Η εισερχόμενη καθαρή ακτινοβολία μικρού μήκους R_{ns} (MJ m⁻² day⁻¹) υπολογίζεται ως:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (2.17)$$

όπου α συντελεστής ανακλαστικότητας της καλλιέργειας αναφοράς ή albedo ($\alpha = 0.23$) και R_s η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία (MJ m⁻² day⁻¹)

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, R_s ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), σε περίπτωση που δεν μετράται, υπολογίζεται από τη σχέση :

$$R_s = \left(a_s + b_s \cdot \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (2.18)$$

όπου : n η πραγματική διάρκεια της ημέρας σε ώρες,

N η μέγιστη δυνατή διάρκεια της ημέρας σε ώρες,

n/N η σχετική διάρκεια της ημέρας,

R_a η ηλιακή ακτινοβολία στο άνω όριο της ατμόσφαιρας ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

a_s , b_s σταθερές παλινδρόμησης. Σε περίπτωση που δεν μπορούν να υπολογιστούν συνιστώνται οι τιμές $a_s = 0.25$ και $b_s = 0.50$.

Η ηλιακή ακτινοβολία στο άνω όριο της ατμόσφαιρας, R_a , και η μέγιστη δυνατή διάρκεια της ημέρας, N , μπορούν να υπολογιστούν από τις ακόλουθες εξισώσεις (Allen *et al.*, 1998):

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\omega_s)] \quad (2.19)$$

$$N = \omega_s \cdot \left(\frac{24}{\pi} \right) \quad (2.20)$$

Όπου: G_{sc} ηλιακή σταθερά ($0.0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$),

d_r η σχετική απόσταση μεταξύ γης και ήλιου,

ω_s η ωριαία γωνία σε rad,

φ το γεωγραφικό πλάτος σε rad,

δ η απόκλιση του ήλιου σε rad.

Τα d_r , δ , και ω_s υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$d_r = 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (2.21)$$

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (2.22)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)] \quad (2.23)$$

όπου J η Ιουλιανή ημέρα του έτους [$J=1, 2, \dots, 365$ (366)].

Εναλλακτικά τα d_r , δ , και N υπολογίζονται από τις εξισώσεις (Kotsopoulos and Babajimopoulos, 1997) :

$$d_r = 1 + 0.0334 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot (J-3)}{365}\right) \quad (2.24)$$

$$\delta = 0.409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (J+283)}{365}\right) \quad (2.25)$$

$$N = \omega_s \cdot \left(\frac{24}{\pi}\right) + M \quad (2.26)$$

όπου $M=0.01172+0.0008936 \cdot \varphi + 7.4152 \cdot \varphi^3$, ενώ για το ω_s χρησιμοποιούνται οι εξ. (2.24) και (2.25).

Η εξερχόμενη καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους, R_{nl} ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), υπολογίζεται ως (FAO 56, 1998) :

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \cdot (0.34 - 0.14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (2.27)$$

όπου : σ σταθερά Stephan - Boltzman ($4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ } ^\circ\text{K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$),

$T_{\max,K}$ μέγιστη απόλυτη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$],

$T_{\min,K}$ μέγιστη απόλυτη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας [$\text{K} = ^\circ\text{C} + 273.16$],

e_a η πραγματική πίεση των υδρατμών στον αέρα (kPa),

R_s η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

R_{so} η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία όταν δεν υπάρχει νέφωση ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) που για οποιοδήποτε υψόμετρο z (m) πάνω από το επίπεδο της θάλασσας υπολογίζεται ως :

$$R_{so} = (a_s + b_s + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) \cdot R_a \quad (2.28)$$

Ο λόγος της σχετικής ηλιακής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος R_s/R_{so} είναι πάντα ≤ 1 .

Όταν η ταχύτητα του ανέμου u δίνεται σε διαφορετικό των 2m ύψος από την επιφάνεια του εδάφους τροποποιείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (Allen *et al.*, 1998) :

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (2.29)$$

Όπου: u_2 η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m από το έδαφος (m s^{-1}),
 u_z η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z m από το έδαφος (m s^{-1}),
 z το υψόμετρο μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου (m).

Εναλλακτικά το u_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (Doorenbos and Pruitt, 1977) :

$$u_2 = u_z \left[\frac{2}{z} \right]^a \quad (2.30)$$

Όπου: a εκθέτης που λαμβάνει την τιμή 0.17 όταν $z > 2\text{m}$ και 0.22 όταν $z < 2\text{m}$, ενώ γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή $a=0.2$ (Jensen, 1974).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι μέθοδοι υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής από μετεωρολογικά δεδομένα απαιτούν ποικίλες κλιματολογικές και φυσικές παραμέτρους. Μερικές από τις μετρήσεις γίνονται κατευθείαν σε μετεωρολογικούς σταθμούς. Άλλες παράμετροι συσχετίζονται με τα κοινώς μετρούμενα δεδομένα και υπολογίζονται με την βοήθεια μιας εμπειρικής σχέσης. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά στην πηγή, την μέτρηση και τον υπολογισμό όλων των μετεωρολογικών δεδομένων που χρειάζονται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με την χρήση της εξίσωσης FAO Penman Monteith.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να εκφραστούν σε διάφορες μονάδες. Οι παράγοντες μετατροπής μεταξύ των παραπάνω μονάδων και των μονάδων, χρησιμοποιούνται στο σύστημα S.I. Οι κλιματικές παράμετροι καθώς και διαδικασίες για την στατιστική ανάλυση, την υπόθεση, την διόρθωση και την συμπλήρωση ελλিপών δεδομένων, υπολογίζονται με την βοήθεια κάποιων πολύπλοκων εξισώσεων και δεν κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν, (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999).

3.1 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΤ

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες που καθορίζουν την ΕΤ είναι κλιματικές παράμετροι που παρέχουν ενέργεια για την εξάτμιση και την απομάκρυνση των υδρατμών από την επιφάνεια της εξάτμισης. Οι κυριότεροι παράγοντες παρουσιάζονται παρακάτω:

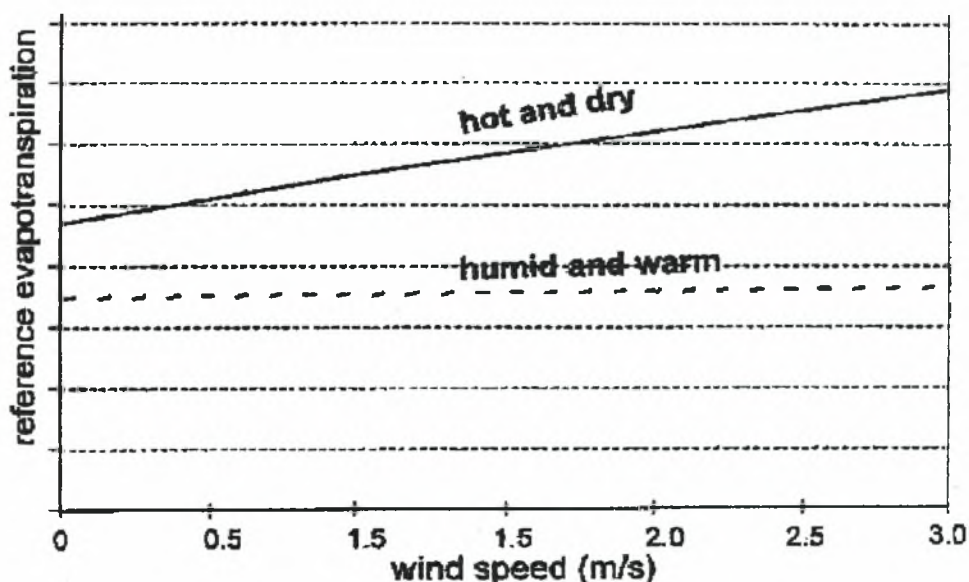
3.1.1 Ηλιακή ακτινοβολία.

Η διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής επηρεάζεται από το ποσό της διαθέσιμης ενέργειας που απαιτείται για την εξάτμιση. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας και είναι ικανή να μετατρέψει τεράστιες ποσότητες υγρού νερού σε υδρατμούς. Το δυνατό ποσό ακτινοβολίας που μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια εξάτμισης καθορίζεται από την τοποθεσία και την εποχή. Εξαιτίας της κίνησης του ηλίου, η ακτινοβολία που φτάνει στη γη διαφέρει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή. Το πραγματικό ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη εξαρτάται από την καθαρότητα της ατμόσφαιρας καθώς και από την ύπαρξη

νεφών τα οποία απορροφούν και αντανakλούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας. Όταν όμως εκτιμάται η επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας επάνω στην εξατμισοδιαπνοή, πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιείται όλη η διαθέσιμη ενέργεια για την εξάτμιση του νερού. Μέρος της ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιείται για να θερμανθούν η ατμόσφαιρα και το έδαφος,

3.1.2 Θερμοκρασία του αέρα

Η ηλιακή ακτινοβολία η οποία απορροφάται από την ατμόσφαιρα και η θερμότητα η οποία εκπέμπεται από την γη αυξάνουν την θερμοκρασία του αέρα. Η θερμότητα επομένως του περιβάλλοντος την καλλιέργεια αέρα, μεταφέρει ενέργεια στην καλλιέργεια και συνεπώς αποτελεί μια σημαντική επιρροή στο ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας Έτσι κατά την διάρκεια θερμών και ηλιόλουστων ημερών, η απώλεια νερού από τα φυτά είναι μεγαλύτερη απ' ότι σε ψυχρές και συννεφιασμένες μέρες.



Σχήμα 3.1 Απεικόνιση της επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου (wind speed) στην εξατμισοδιαπνοή σε ξηροθερμικές (hot and dry) και υγροθερμικές (humid and warm) συνθήκες.

3.1.3 Υγρασία του αέρα

Ενώ η παροχή ενέργειας από τον ήλιο και τον περιβάλλοντα αέρα είναι η κύρια αιτία για την εξάτμιση του νερού, η διαφορά ανάμεσα στην πίεση των υδρατμών στην επιφάνεια εξάτμισης και στον περιβάλλοντα αέρα είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την απομάκρυνση των υδρατμών. Καλά αρδευόμενες καλλιέργειες σε θερμές και ξηρές περιοχές καταναλώνουν

μεγάλα ποσά νερού εξαιτίας της περίσσειας της ενέργειας της ατμόσφαιρας. Σε υγρές, τροπικές περιοχές, με μεγάλη εισροή ενέργειας, η υγρασία του αέρα τείνει να ελαττώσει τα ποσοστά εξατμισοδιαπνοής των φυτών. Σ' ένα τέτοιο περιβάλλον, ο αέρας που είναι ήδη πολύ κοντά στον κορεσμό του, μπορεί να αποθηκεύσει ελάχιστο επιπλέον νερό κι έτσι το ποσοστό της ET_c είναι χαμηλότερο από αυτό των ξηρών περιοχών,

3.1.4 Ταχύτητα του ανέμου.

Η διαδικασία της απομάκρυνσης των ατμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό στην κίνηση και την ταχύτητα του ανέμου που οδηγεί στην μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων αέριας μάζας πάνω από την επιφάνεια εξάτμισης. Όταν το νερό εξατμίζεται, ο αέρας γίνεται σταδιακά κορεσμένος με υδρατμούς. Εάν λοιπόν ο κορεσμένος αέρας δεν απομακρυνθεί και δεν αντικατασταθεί με ξηρό αέρα, το ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής θα μειωθεί.

Η συνδυασμένη επίδραση ορισμένων κλιματικών παραγόντων που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1 για δυο διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Η εξατμισοδιαπνοή είναι μεγάλη με θερμό και ξηρό καιρό εξαιτίας της ξηρασίας του αέρα και του ποσού της διαθέσιμης ενέργειας εξαιτίας της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και της λανθάνουσας θερμότητας. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ένα αρκετά μεγάλο ποσό υδρατμών μπορεί να αποθηκευτεί στον ακόρεστο περιβάλλοντα αέρα ενώ η κίνηση του αέρα μπορεί να μεταφέρει τον υγρό αέρα μακριά από την επιφάνεια της εξατμισοδιαπνοής επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερη εξάτμιση του νερού από την φυλλική επιφάνεια. Αντίθετα, κάτω από υγρές καιρικές συνθήκες, η υψηλή υγρασία του αέρα και η παρουσία νεφών προκαλούν μείωση της ET_c . Η επίδραση των μεγαλύτερων ταχυτήτων του ανέμου στην εξατμισοδιαπνοή φαίνεται από την κλίση της καμπύλης στο σχήμα 3.1. Όσο πιο ξηρή είναι η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η επίδραση στην ET και επομένως μεγαλύτερη είναι και η κλίση στην καμπύλη του σχήματος 3.1. Για υγρές συνθήκες, ο άνεμος μπορεί να αντικαταστήσει τον πλήρως κορεσμένο αέρα με ελάχιστα λιγότερο κορεσμένο αέρα και να απομακρύνει την θερμική ενέργεια. Συνεπώς, η ταχύτητα του ανέμου επιδρά στην ET σαφώς πιο περιοριστικά και σε μικρότερο ποσοστό από ότι σε δρα σε ξηροθερμικές συνθήκες όπου μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες διακυμάνσεις στο ποσοστό της εξατμισοδιαπνοής της

καλλιέργειας.

3.2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Υπάρχουν αρκετές σχέσεις για τις κλιματικές παραμέτρους. Η επίδραση των κύριων κλιματικών παραμέτρων στην εξατμισοδιαπνοή μπορεί να εκτιμηθεί με την βοήθεια αυτών των εξισώσεων. Μερικές από αυτές τις σχέσεις απαιτούν παραμέτρους ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της ατμόσφαιρας. Πριν να μελετηθούν οι τέσσερις κύριες καιρικές παράμετροι, θα μελετηθούν μερικές ατμοσφαιρικές παραμέτροι.

3.2.1 Ατμοσφαιρική πίεση (P)

Η ατμοσφαιρική πίεση είναι η πίεση η οποία ασκείται από το βάρος της γης της ατμόσφαιρας. Η εξάτμιση σε μεγάλα ύψη προωθείται εξαιτίας της χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσεως όπως εκφράζεται στην ψυχομετρική σταθερά. Η επίδραση όμως είναι μικρή και στην διαδικασία υπολογισμού μια μέση τιμή για κάθε περιοχή είναι αρκετή. Μια απλούστευση του νόμου των ιδανικών αερίων, σε σταθερή ατμόσφαιρα με σταθερή θερμοκρασία 20°C, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής πίεσεως P:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (3.1)$$

όπου P: η ατμοσφαιρική πίεση [kPa],

z: ύψος πάνω από το επίπεδο της θάλασσας [m].

Διάφορες τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης σαν συνάρτηση του ύψους δίνονται στο παράρτημα 2 του (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999) (πίνακας 2.1).

3.2.2 Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (λ).

Η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, λ, εκφράζει την ενέργεια η οποία απαιτείται έτσι ώστε μια συγκεκριμένη μάζα υγρού νερού κάτω από συνθήκες σταθερής πίεσης και σταθερής θερμοκρασίας να μεταπέσει στην αέρια φάση (υδρατμοί). Η τιμή του λ μεταβάλλεται και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Σε μια υψηλή θερμοκρασία, απαιτείται λιγότερη ενέργεια απ' ότι στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Όταν το λ μεταβάλλεται ελάχιστα πάνω από το κανονικό εύρος της θερμοκρασίας τότε στην απλοποίηση της εξίσωσης Penman-Monteith χρησιμοποιείται μόνο η τιμή 2,45 MJ/kg . Αυτή είναι και η λανθάνουσα

θερμότητα εξάτμισης για μια θερμοκρασία αέρα περίπου γύρω στους 20°C.

3.2.3 Ψυχομετρική σταθερά (γ).

Η ψυχομετρική σταθερά, γ, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0,665 * 10^{-3} P \quad (3.2)$$

όπου γ : ψυχομετρική σταθερά $[kPa^{\circ}C^{-1}]$,

P : ατμοσφαιρική πίεση [kPa],

λ : λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, 2.45 [MJ/kg],

c_p : συγκεκριμένη θερμότητα σε σταθερή πίεση $1.013 \cdot 10^{-3} [MJkg^{-1}^{\circ}C^{-1}]$

ε : λόγος του μοριακού βάρους του νερού σε υγρό /ξηρό αέρα =0.622.

Η συγκεκριμένη θερμότητα σε σταθερή πίεση είναι το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας μιας συγκεκριμένης μάζας αέρα κατά ένα βαθμό υπό σταθερή πίεση. Η τιμή της εξαρτάται από τη σύσταση του αέρα π.χ. από την υγρασία του. Για τις μέσες και συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες χρησιμοποιείται η τιμή $c_p = 1.013 \cdot 10^{-3} [MJkg^{-1}^{\circ}C^{-1}]$. Εξάλλου, εφόσον για κάθε περιοχή χρησιμοποιείται μια μέση τιμή ατμοσφαιρικής πίεσης, η ψυχομετρική σταθερά είναι σταθερή για κάθε μια περιοχή. Διάφορες τιμές της ψυχομετρικής σταθεράς σαν συνάρτηση του ύψους δίνονται στο παράρτημα 2 του (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999) (πίνακας 2.2).

3.3 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ.

Μια κύρια μελέτη και ασχολία της αγρομετεωρολογίας είναι η θερμοκρασία του αέρα κοντά στο επίπεδο της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας. Στους παραδοσιακούς και τους σύγχρονους αυτόματους μετεωρολογικούς σταθμούς η θερμοκρασία του αέρα μετράται μέσα σε σκέπαστρα (Stevenson screens or ventilated radiation shields) τα οποία τοποθετούνται στη σειρά σε απόσταση 2 μέτρων από το έδαφος σύμφωνα με τις οδηγίες και τα πρότυπα του Παγκοσμίου Μετεωρολογικού Οργανισμού (W.M.O.). Τα σκέπαστρα αυτά είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να προστατεύουν τα όργανα από την άμεση έκθεση τους στην ηλιακή ακτινοβολία. Η κατασκευή τους με γρίλιες επιτρέπει την ελεύθερη κίνηση του αέρα γύρω από τα διάφορα όργανα. Η θερμοκρασία του

αέρα μετράται με θερμόμετρα, θερμικές αντιστάσεις ή θερμοζεύγη τα οποία βρίσκονται μέσα στο σκέπαστρο. Τα θερμόμετρα μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας καταγράφουν την μέγιστη και την ελάχιστη θερμοκρασία του αέρα αντίστοιχα επί 24ώρου βάσεως. Οι θερμογράφοι καταγράφουν την στιγμιαία θερμοκρασία του αέρα για περιόδους μιας ημέρας ή μιας εβδομάδας. Οι ηλεκτρονικοί σταθμοί συχνά παίρνουν μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα κάθε λεπτό και υπολογίζουν και μέσες ελάχιστες και μέγιστες τιμές θερμοκρασίας. Εξαιτίας της μη γραμμικότητας των δεδομένων της υγρασίας στην εξίσωση Penman-Monteith, η τάση των υδρατμών για μια συγκεκριμένη περίοδο θα πρέπει να υπολογίζεται σαν την μέση τιμή της τάσης υδρατμών στην ελάχιστη και την μέγιστη θερμοκρασία αυτής της περιόδου. Η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία του αέρα (T_{min}) και η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία του αέρα (T_{max}) είναι η ελάχιστη και η μέγιστη αντίστοιχα παρατηρούμενη τιμή της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια μιας 24ωρης περιόδου η οποία χρονικά αρχίζει τα μεσάνυχτα. Οι T_{min} και T_{max} για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους όπως εβδομάδες, 10ήμερα ή ακόμη και μήνες λαμβάνονται διαιρώντας το άθροισμα των επιμέρους ημερησίων τιμών δια το σύνολο των ημερών της περιόδου. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα (T_{mean}) χρησιμοποιείται μόνο στην εξίσωση Penman-Monteith για τον υπολογισμό της κλίσης της καμπύλης της τάσης των υφρατμών (Δ) και του αντίκτυπου της μέσης πυκνότητας του αέρα, καθώς η επίδραση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας είναι πολύ μικρή σε αυτές τις περπτώσεις. Για ευκολία η T_{mean} εκφράζεται σαν τον μέσο αριθμητικό όρο μεταξύ τις μέγιστης και της ελάχιστης παρατηρούμενης τιμής της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια του εικοσιτετραώρου, παρά σαν την μέση τιμή των διαφόρων ωριαίων μετρήσεων.

$$T_{mean} = (T_{max} + T_{min}) / 2 \quad (3.3)$$

Η θερμοκρασία δίνεται σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$) ή σε βαθμούς Φαρενάιτ ($^{\circ}\text{F}$). Ο πίνακας μετατροπής δίνεται στο παράρτημα 1. Σε ορισμένες μεθόδους υπολογισμού η θερμοκρασία πρέπει να δίνεται σε βαθμούς Kelvin (K). Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να βρεθεί προσθέτοντας την τιμή 273,16 στην θερμοκρασία που είναι εκφρασμένη σε βαθμούς Κελσίου.

3.4 ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

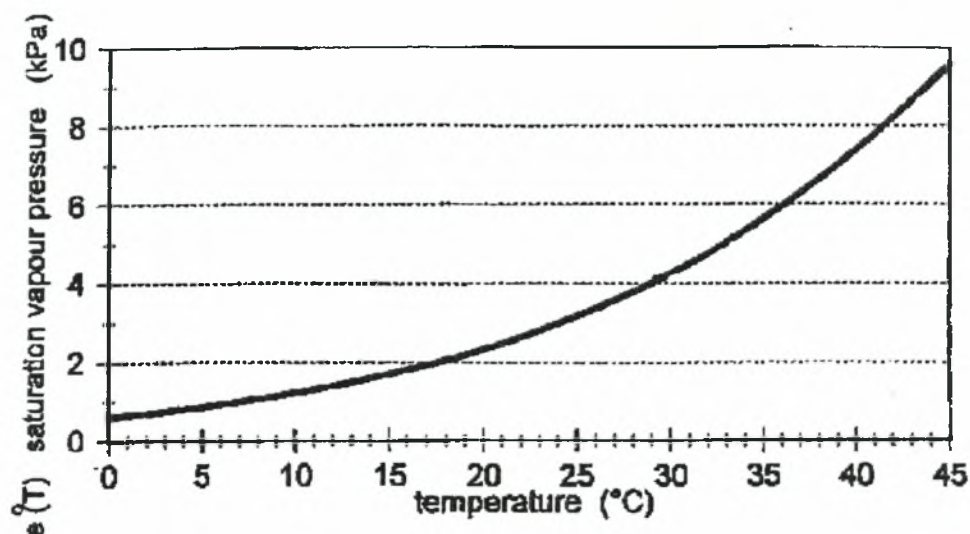
Το υδατικό δυναμικό του αέρα μπορεί να εκφρασθεί ποικιλοτρόπως. Στην αγρομετεωρολογία, η τάση των υδρατμών, το σημείο δρόσου, και η σχετική υγρασία αποτελούν κοινές εκφράσεις περιγραφής της υγρασίας του αέρα.

3.4.1 Τάση υδρατμών

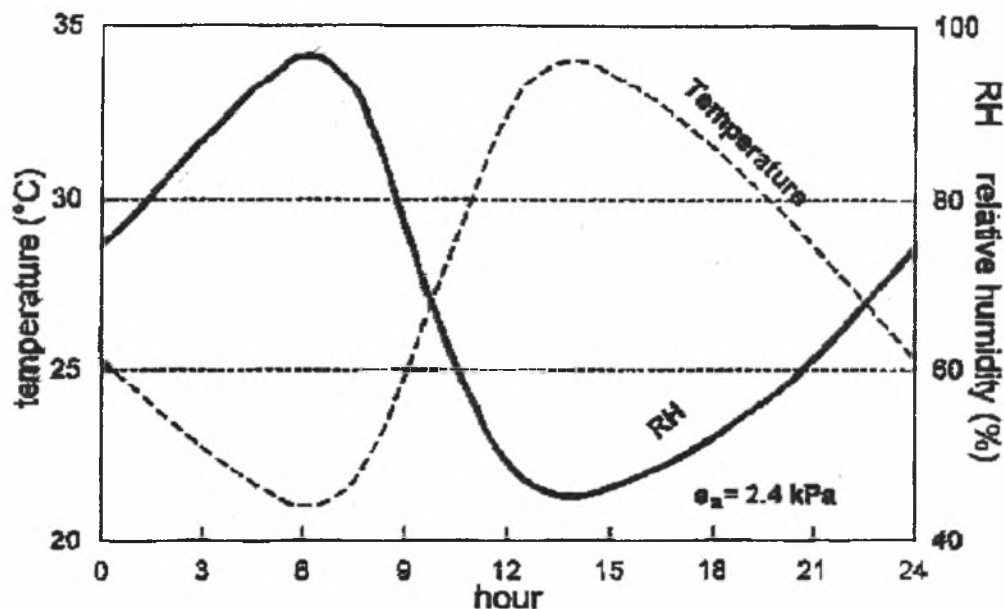
Οι υδρατμοί είναι αέρια και η πίεση τους συμβάλλει στην συνολική ατμοσφαιρική πίεση. Το ποσό του νερού στον αέρα είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη μερική πίεση η οποία ασκείται από τους υδρατμούς στον αέρα και είναι επομένως ένα άμεσο μέτρο υπολογισμού του ποσού του νερού που βρίσκεται στον αέρα.

Η πίεση μετράται στο σύστημα S.I. σε Pascal (Pa) και όχι σε εκατοστά νερού ή χιλιοστά στήλης υδραργύρου ή σε ατμόσφαιρες, bars κ.α. Οι παράγοντες μετατροπής μεταξύ των διαφόρων μονάδων μέτρησης της πίεσης σε Pa δίνονται στο παράρτημα 1. Καθώς όμως το Pascal αναλύεται σε μια σχετικά μικρή δύναμη (1 Newton) η οποία εφαρμόζεται σε μια σχετικά μεγάλη επιφάνεια (1 m^2), συχνά χρησιμοποιούνται πολλαπλάσια του και συνήθως τα kilopascals ($1 \text{ kilopascal} = 1000 \text{ Pa}$).

Σ' ένα κλειστό σύστημα όπου υπάρχει μια επιφάνεια εξάτμισης, σταδιακά επέρχεται μια ισορροπία μεταξύ των φαινομένων της εξάτμισης και της υγροποίησης. Δηλαδή, όσα μόρια του νερού περνούν από την αέρια στην υγρή φάση σ' ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τόσα μόρια υγροποιούνται στο ίδιο χρονικό διάστημα. Στην συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά την οποία συμβαίνει αυτό, ο αέρας είναι κορεσμένος αφού δεν μπορεί να αποθηκεύσει άλλα μόρια νερού. Η αντίστοιχη πίεση του αέρα εκείνη την στιγμή καλείται πίεση κορεσμού ($e^{\circ}(T)$). Ο αριθμός των μορίων του νερού που μπορούν να αποθηκευτούν στον αέρα εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα (T). Όσο ψηλότερη είναι η θερμοκρασία του αέρα τόσο μεγαλύτερη είναι και η αποθηκευτική ικανότητα του και τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της πίεσης κορεσμού (σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2 Τάση υδρατμών κορεσμού (saturation vapor pressure) σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας (temperature): Καμπύλη $e^0(T)$



Σχήμα 3.3 Μεταβολή της σχετικής υγρασίας (relative humidity) κατά τη διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου για σταθερή πραγματική τάση ατμών 2.4 kPa.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, η κλίση της καμπύλης μεταβάλλεται εκθετικά με την θερμοκρασία. Σε χαμηλές θερμοκρασίες, η κλίση είναι μικρή και μεταβάλλεται ελάχιστα καθώς η θερμοκρασία αυξάνει- Σε υψηλές θερμοκρασίες η κλίση είναι μεγάλη και ακόμη και μικρές αλλαγές της θερμοκρασίας έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες μεταβολές της κλίσης. Η κλίση της καμπύλης της πίεσης κορεσμού, Δ , είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στην περιγραφή του φαινομένου της εξάτμισης και απαιτείται στις εξισώσεις για τον υπολογισμό της E^0 από κλιματικά δεδομένα.

Η πραγματική τάση ατμών (e_a) είναι η τάση των ατμών που ασκείται από το νερό στον αέρα. Όταν ο αέρας δεν είναι κορεσμένος, η πραγματική τάση ατμών είναι χαμηλότερη από την πίεση κορεσμού. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών πιέσεων καλείται έλλειμμα πίεσης κορεσμού ή έλλειμμα κορεσμού και είναι ένας ακριβής δείκτης της πραγματικής υδατοχωρητικότητας του αέρα.

3.4.2 Σημείο Δρόσου

Το σημείο δρόσου είναι η θερμοκρασία στην οποία χρειάζεται να ψυχθεί μια μάζα αέρα έτσι ώστε να κορεστεί. Η πραγματική τάση ατμών του αέρα είναι η πίεση κορεσμού στο σημείο δρόσου. Όσο ξηρότερος είναι ο αέρας, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας του αέρα και του σημείου δρόσου.

3.4.3 Σχετική υγρασία

Η σχετική υγρασία (RH) εκφράζει τον βαθμό κορεσμού του αέρα σαν τον λόγο της πραγματικής τάσης ατμών (e_a) προς την πίεση κορεσμού του αέρα στην ίδια θερμοκρασία (T):

$$RH = 100 \frac{e_a}{e^0 T} \quad (3.4)$$

Η σχετική υγρασία είναι το ποσοστό μεταξύ της ποσότητας νερού που πραγματικά συγκρατεί μια μάζα κινούμενου περιβάλλοντος αέρα και της ποσότητας νερού που θα μπορούσε να συγκρατήσει ο ίδιος αέρας στην ίδια θερμοκρασία. Το μέγεθος δεν έχει διαστάσεις και δίνεται σαν ποσοστό. Παρόλο που η πραγματική τάση των ατμών μπορεί να παραμείνει σχετικά σταθερή κατά την διάρκεια της ημέρας, η σχετική υγρασία μεταβάλλεται μεταξύ ενός μέγιστου κοντά στην ανατολή του ηλίου κι ενός ελάχιστου γύρω στις πρώτες απογευματινές ώρες (σχήμα 3.3). Αυτή η διακύμανση της σχετικής υγρασίας είναι απόρροια του γεγονότος ότι η πίεση κορεσμού του αέρα καθορίζεται από την θερμοκρασία του αέρα. Έτσι, καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας, μεταβάλλεται αντίστοιχα και η σχετική υγρασία του αέρα.

3.4.4 Μέτρηση

Δεν είναι δυνατό να μετρηθεί απευθείας η πραγματική τάση ατμών του αέρα. Η τάση ατμών μπορεί να υπολογιστεί όμως όταν είναι γνωστά η σχετική υγρασία ή το σημείο δρόσου.

Η σχετική υγρασία μπορεί να μετρηθεί απευθείας με υγρόμετρα. Η μέτρηση αυτή βασίζεται στις ιδιότητες ορισμένων υλικών όπως το μαλλί, το οποίο μεταβάλλει το μέγεθος του όταν μεταβάλλεται και η σχετική υγρασία του αέρα, ή χρησιμοποιώντας μια θερμοχωρητική πλάκα, όπου η ηλεκτρική χωρητικότητα αλλάζει με τις μεταβολές της RH. Η τάση ατμών μπορεί να μετρηθεί έμμεσα με την χρήση των ψυχρόμετρων τα οποία μετρούν την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο θερμομέτρων, τα λεγόμενα θερμόμετρα ξηρού και υγρού αέρα. Το θερμόμετρο ξηρού αέρα μετρά την θερμοκρασία του αέρα. Το θερμόμετρο υγρού αέρα είναι συνεχώς καλυμμένο με ένα υγρό ύφασμα. Η εξάτμιση του νερού από το ύφασμα, καταναλώνει ενέργεια, χαμηλώνοντας έτσι την θερμοκρασία του θερμόμετρου. Όσο πιο ξηρός είναι ο αέρας, τόσο μεγαλύτερη είναι η εξάτμιση από το πανί κι επομένως καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια και πέφτει περισσότερο η θερμοκρασία. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των θερμομέτρων ξηρού και υγρού αέρα καλείται *wet bulb depression* και είναι ένα μέτρο της υγρασίας του αέρα.

Το σημείο δρόσου μετράται με ειδικά όργανα τα οποία ψυχραίνουν τον αέρα σένα κλειστό σύστημα υπό σταθερή πίεση, εωσότου να κορεστεί (σχηματισμός υδρατμών). Η θερμοκρασία στην οποία ο αέρας γίνεται κορεσμένος σε υδρατμούς καλείται σημείο δρόσου.

Τόσο στις μετρήσεις της σχετικής υγρασίας όσο και στις μετρήσεις του σημείου δρόσου ενδέχεται πολλές φορές να υπάρχουν αποκλίσεις. Τα σφάλματα των μετρήσεων είναι κοινά τόσο για τα παλαιότερα όργανα μέτρησης όσο και για τα σύγχρονα ηλεκτρονικά όργανα. Επομένως θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στην εκτίμηση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μετρήσεων της σχετικής υγρασίας και του σημείου δρόσου. Ο παρατηρητής, είναι καλό να συγκρίνει τα δεδομένα των σημείου δρόσου που υπολογίζονται από μετρήσεις, με τις μετρήσεις της ημερήσιας ελάχιστης θερμοκρασίας. Συχνά, είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται δεδομένα του σημείου δρόσου τα οποία υπολογίζονται από μετρήσεις ημερησίας ελάχιστης θερμοκρασίας από το να χρησιμοποιούνται αναξιόπιστες μετρήσεις σχετικής υγρασίας, (FAO-56, *Estimation Of Crop Evapotranspiration*, 1999).

3.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

3.5.1 Μέση πίεση κορεσμού των υδρατμών (e_s)

Καθώς η πίεση κορεσμού των υδρατμών συνδέεται με τη θερμοκρασία του αέρα, μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από αυτή. Η σχέση που συνδέει τις παραπάνω παραμέτρους είναι:

$$e^0(T) = 0.6108 e^{\left[\frac{1702.7T}{T+237.3} \right]} \quad (3.5)$$

όπου $e^0(T)$: πίεση κορεσμού των υδρατμών στη θερμοκρασία T (kPa)

T : θερμοκρασία του αέρα (°C)

Διάφορες τιμές της e_s σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα δίνονται στο παράρτημα 2 (πίνακας 2.3). Εξαιτίας της μη γραμμικότητας της παραπάνω εξίσωσης, η μέση πίεση κορεσμού των υδρατμών για περιόδους μιας ημέρας, εβδομάδας, δεκαημέρου ή μήνα θα πρέπει να υπολογίζονται σαν τον μέσο όρο μεταξύ των πιέσεων κορεσμού στην μέση ελάχιστη και την μέση μέγιστη θερμοκρασία της περιόδου:

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (3.6)$$

Όταν χρησιμοποιείται η μέση θερμοκρασία του αέρα αντί για την ημερήσια ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία έχουμε σαν αποτέλεσμα χαμηλότερες εκτιμήσεις της e_s . Έτσι ο παράγοντας " $e_s - e_a$ " (παράγοντας που εκφράζει την ικανότητα που έχει η ατμόσφαιρα για εξάτμιση) θα είναι κι αυτός μικρότερος κι αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα μια ελαφρά υποτίμηση της τιμής της ΕΤο. Επομένως, η μέση πίεση κορεσμού των υδρατμών θα πρέπει να υπολογίζεται σαν ο μέσος όρος μεταξύ της πίεσης κορεσμού στην ημερήσια ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία.

3.5.2 Κλίση της καμπύλης "πίεση κορεσμού υδρατμών-θερμοκρασίας" (Δ).

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής, η κλίση της γραμμής στη σχέση πίεση κορεσμού υδρατμών - θερμοκρασία Δ, είναι απαραίτητη. Η κλίση αυτή σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία δίνεται από τον τύπο.

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2}$$

Όπου Δ : κλίση της καμπύλης πίεση κορεσμού υδρατμών- θερμοκρασία σε ($kPa^{\circ}C^{-1}$)

T : θερμοκρασία του αέρα σε ($^{\circ}C$)

$\exp [..]$: 2.7183 (βάση του φυσικού λογαρίθμου) υψωμένη στη δύναμη [...]

Τιμές της κλίσης Δ για διάφορες θερμοκρασίες του αέρα δίνονται στο παράρτημα 2 (πίνακας 2.4). Στην εξίσωση Penman-Monteith όπου το Δ εμφανίζεται τόσο στον αριθμητή όσο και στον παρονομαστή, η κλίση της καμπύλης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την μέση θερμοκρασία του αέρα, (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999).

3.5.3 Πραγματική τάση ατμών (e_a) υπολογιζόμενη από το σημείο δρόσου

Αφού το σημείο δρόσου είναι η θερμοκρασία στην οποία πρέπει να ψυχθεί ο αέρας έτσι ώστε να κορεστεί, η πραγματική τάση ατμών (e_a) είναι ουσιαστικά η πίεση κορεσμού των υδρατμών στο σημείο δρόσου (T_{dew}) ή:

$$e_a = e^0(T_{dew}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right] \quad (3.7)$$

3.5.4 Πραγματική τάση ατμών (e_a) υπολογιζόμενη από ψυχομετρικά δεδομένα

Η πραγματική τάση ατμών μπορεί να καθοριστεί από την διαφορά μεταξύ των θερμοκρασιών του θέρμου και του υγρού θερμομέτρου την επανομαζόμενη και wet bulb depression. Η σχέση μεταξύ τους εκφράζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$e_a = e^0(T_{wet}) - \gamma_{psy} (T_{dry} - T_{wet}) \quad (3.8)$$

όπου e_a : πραγματική τάση ατμών [kPa].

$e^0(T_{wet})$: πίεση κορεσμού των υδρατμών στην θερμοκρασία του ξηρού βολβού.

γ_{psy} : ψυχομετρική σταθερά του οργάνου [$kPa^{\circ}C^{-1}$].

$T_{dry} - T_{wet}$: (wet bulb depression) διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ υγρού και ξηρού βολβού.

Η ψυχρομετρική σταθερά του οργάνου δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{psy} = a_{psy} P \quad (3.9)$$

όπου a_{psy} είναι ένας συντελεστής η τιμή του οποίου εξαρτάται από τον τύπο αερισμού του υγρού θερμομέτρου [$^{\circ}\text{C}^{-1}$], και P είναι η ατμοσφαιρική πίεση [kPa]. Ο συντελεστής a_{psy} εξαρτάται κυρίως από το σχέδιο του ψυχρομέτρου και από τον βαθμό αερισμού του υγρού θερμομέτρου. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τιμές:

$a_{psy} = 0,000662$ για αεριζόμενα (τύπου Asman) ψυχρόμετρα, με κίνηση του αέρα με ταχύτητα 5 m/s

0,000800 για φυσικώς αεριζόμενα ψυχρόμετρα (περίπου 1 m/s)

0,001200 για μη αεριζόμενα ψυχρόμετρα εγκατεστημένα σε εσωτερικούς χώρους.

3.5.5 Πραγματική τάση ατμών (e_a) υπολογιζόμενη από δεδομένα σχετικής υγρασίας

Η πραγματική τάση ατμών μπορεί επίσης να υπολογιστεί από τη σχετική υγρασία. Ανάλογα με την διαθεσιμότητα των δεδομένων μπορούν Χρησιμοποιηθούν διάφορες εξισώσεις:

➤ Για RH_{max} και RH_{min} :

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e^0(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2} \quad (3.10)$$

Όπου e_a : πραγματική τάση ατμών [kPa]

$e^0(T_{min})$: πίεση κορεσμού των υδρατμών στην ημερήσια ελάχιστη θερμοκρασία [kPa]

$e^0(T_{\max})$: πίεση κορεσμού των υδρατμών στην ημερήσια μέγιστη θερμοκρασία [kPa]

RH_{\max} : μέγιστη σχετική υγρασία [%]

RH_{\min} : ελάχιστη σχετική υγρασία [%]

Για περιόδους μιας εβδομάδας, ενός δεκαημέρου ή ενός μήνα, οι τιμές των RH_{\max} και RH_{\min} υπολογίζονται σαν το μέσο όρο των ημερήσιων τιμών της περιόδου.

➤ Για RH_{\max} :

Όταν χρησιμοποιούμε διάφορα όργανα τα οποία μπορούν να δώσουν σημαντικά σφάλματα στην εκτίμηση της RH_{\min} , ή όταν η αξιοπιστία των δεδομένων της RH αμφισβητείται, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μόνο την RH_{\max} :

$$e_a = e^0(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} \quad (3.11)$$

➤ Για RH_{mean} :

Στην περίπτωση της έλλειψης δεδομένων τόσο για την RH_{\max} όσο και για την RH_{\min} , μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια άλλη εξίσωση για την εκτίμηση της e_a :

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} \left[\frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \right] \quad (3.12)$$

Όπου RH_{mean} είναι η μέση σχετική υγρασία, καθορισμένη σαν το μέσο όρο της μέγιστης και της ελάχιστης αντίστοιχα.

3.5.6 Έλλειμμα τάσης ατμού ($e_s - e_a$)

Το έλλειμμα τάσης ατμού είναι η διαφορά μεταξύ της πίεσης κορεσμού και της πραγματικής τάσης των ατμών για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Για χρονικές περιόδους μιας εβδομάδας, ενός δεκαημέρου ή ενός μήνα η e_s υπολογίζεται από την εξίσωση (3.12) χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές T_{\max} και T_{\min} για την περίοδο αυτή. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και η e_a με την

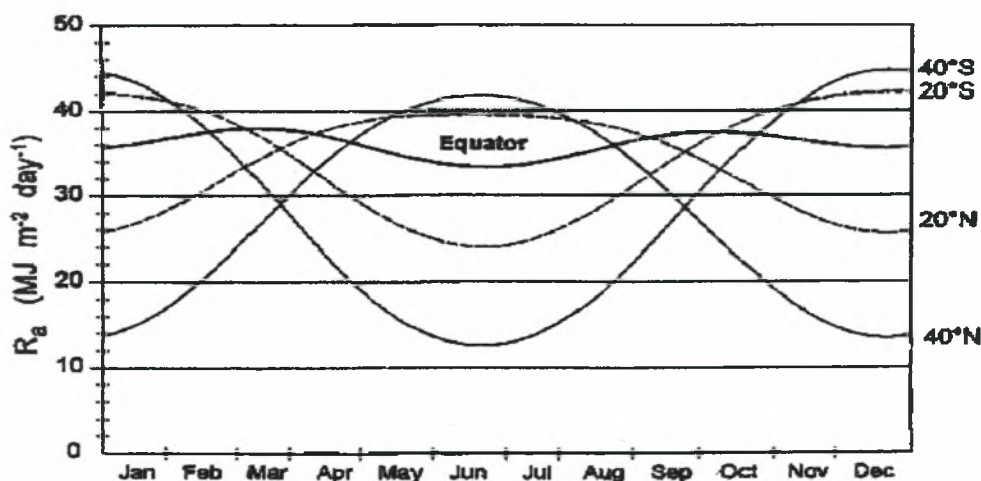
βοήθεια των εξισώσεων (3.10) και (3.11) και τις μέσες μετρήσεις T της συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.

3.6 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

3.6.1 Θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία (R_a)

Η ακτινοβολία η οποία πέφτει σε μια επιφάνεια η οποία είναι κάθετη στις ακτίνες του ηλίου στην κορυφή της ατμόσφαιρας της γης καλείται ηλιακή σταθερά και η τιμή είναι περίπου $0,082 MJ m^{-2} min^{-1}$. Η κατά τόπους ένταση όμως αυτής της ακτινοβολίας καθορίζεται από την γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας και της ομαλότητας της επιφάνειας της ατμόσφαιρας. Η γωνία αυτή μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας και επίσης είναι διαφορετική σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη και σε διαφορετικές εποχές. Η ηλιακή ακτινοβολία η οποία προσπίπτει στην επιφάνεια της γήινης ατμόσφαιρας πάνω σε μια οριζόντια επιφάνεια καλείται θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία, R_a .

Εάν ο ήλιος βρίσκεται ακριβώς πάνω από την επιφάνεια, η γωνία είναι 0 και η θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία είναι $0,082 MJ m^{-2} min^{-1}$. Καθώς οι εποχές αλλάζουν, η θέση του ηλίου, η διάρκεια της ημέρας και επομένως και η R_a αλλάζουν επίσης. Η θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία είναι επομένως μια εξίσωση γεωγραφικού πλάτους, ημερομηνίας και ώρας. Διάφορες τιμές της R_a κατά τη διάρκεια ενός έτους για διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη φαίνονται στο σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Ετήσια διακύμανση της κοσμικής ακτινοβολίας στη ζώνη του ισημερινού (Equator) και 40° βόρεια και νότια.

3.6.2 Ηλιακή ακτινοβολία μικρού μήκους (R_s)

Καθώς η ακτινοβολία διεισδύει στην ατμόσφαιρα, ένα μέρος της διαχέεται, κι ένα άλλο αντανakλάται και απορροφάται από τα ατμοσφαιρικά αέρια τα σύννεφα και την σκόνη. Το ποσό της ακτινοβολίας το οποίο φτάνει σ' ένα οριζόντιο επίπεδο είναι γνωστή σαν ηλιακή ακτινοβολία, R_s . Επειδή ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία χαρακτηρίζονται από ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, η ηλιακή ακτινοβολία αναφέρεται επίσης και σαν ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος.

Για μια ημέρα χωρίς σύννεφα, η R_s είναι περίπου το 75% της θεωρητικής ηλιακής ακτινοβολίας. Σε μια μέρα με συννεφιά, η ακτινοβολία διαχέεται στην ατμόσφαιρα, αλλά ακόμη και με πολύ πυκνή νέφωση, ένα 25% περίπου της θεωρητικής ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια της γης λόγω διάχυσης στην ατμόσφαιρα. Η ηλιακή λοιπόν ακτινοβολία είναι το άθροισμα της άμεσης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος και της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης ύστερα από διάχυση στην ατμόσφαιρα.

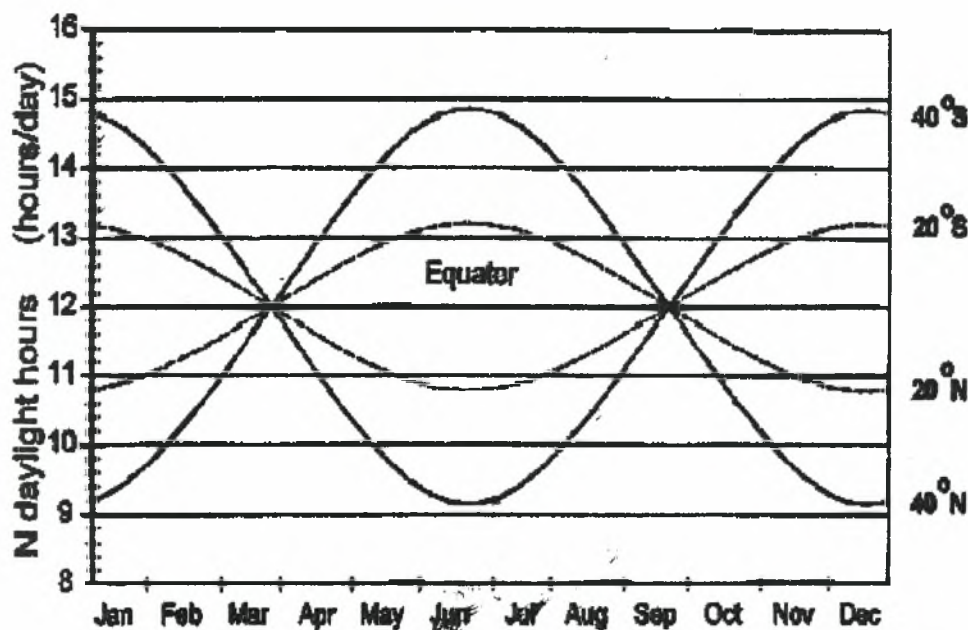
3.6.3 Σχετική μικρού μήκους ακτινοβολία (R_s / R_{so})

Η σχετική μικρού μήκους ακτινοβολία είναι το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας (R_s) προς την ηλιακή ακτινοβολία σε καθαρό ουρανό χωρίς νεφώσεις (R_{so}). Η R_s είναι η ακτινοβολία η οποία προσπίπτει πραγματικά στην επιφάνεια της γης σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, ενώ η R_{so} είναι η ηλιακή ακτινοβολία η οποία θα προσέπιπτε στην επιφάνεια της γης κατά την διάρκεια της ίδιας περιόδου αν όμως δεν υπήρχε νέφωση.

Η σχετική μικρού μήκους ηλιακή ακτινοβολία είναι ένας τρόπος για να παρουσιαστεί το ποσό της νέφωσης στην ατμόσφαιρα (όσο μεγαλύτερη είναι η νέφωση, τόσο μικρότερη θα είναι και η τιμή του ποσοστού). Η τιμή του ποσοστού πάντως κυμαίνεται από 0,33 (πυκνή νέφωση) και 1 (για καθαρό ουρανό). Όταν δεν υπάρχουν πάντως απευθείας μετρήσεις της R_s , η σχετική ακτινοβολία μικρού μήκους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της καθαρής μεγάλου μήκους ακτινοβολίας.

3.6.4 Σχετική διάρκεια ηλιοφάνειας (n/N)

Η σχετική διάρκεια ηλιοφάνειας είναι ένα άλλο ποσοστό για να εκφράσουμε την ένταση της συννεφιάς στην ατμόσφαιρα. Είναι ο λόγος της πραγματικής διάρκειας της ηλιοφάνειας n προς την μέγιστη δυνατή διάρκεια της ηλιοφάνειας ή ώρες ηλιοφάνειας N . Όταν δεν υπάρχει συννεφιά, η πραγματική διάρκεια ηλιοφάνειας ισούται με την μέγιστη διάρκεια ηλιοφάνειας ($n = N$) και επομένως ο λόγος τους ισούται με 1, ενώ σε ημέρες με πυκνή νέφωση το n και επομένως και το ποσοστό n/N μπορεί να πάρουν την τιμή 0. Όταν δεν υπάρχουν απευθείας μετρήσεις της R_s , η σχετική διάρκεια ηλιοφάνειας, n/N , χρησιμοποιείται συχνά για τον υπολογισμό της πραγματικής ηλιακής ακτινοβολίας από την θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία. Όπως και η θεωρητική ηλιακή ακτινοβολία, έτσι και το N εξαρτάται από την θέση του ηλίου και είναι επομένως μια εξίσωση του γεωγραφικού πλάτους και της ημερομηνίας. Ημερήσιες τιμές της N κατά την διάρκεια ενός έτους για διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη φαίνονται στο σχήμα 3.5.



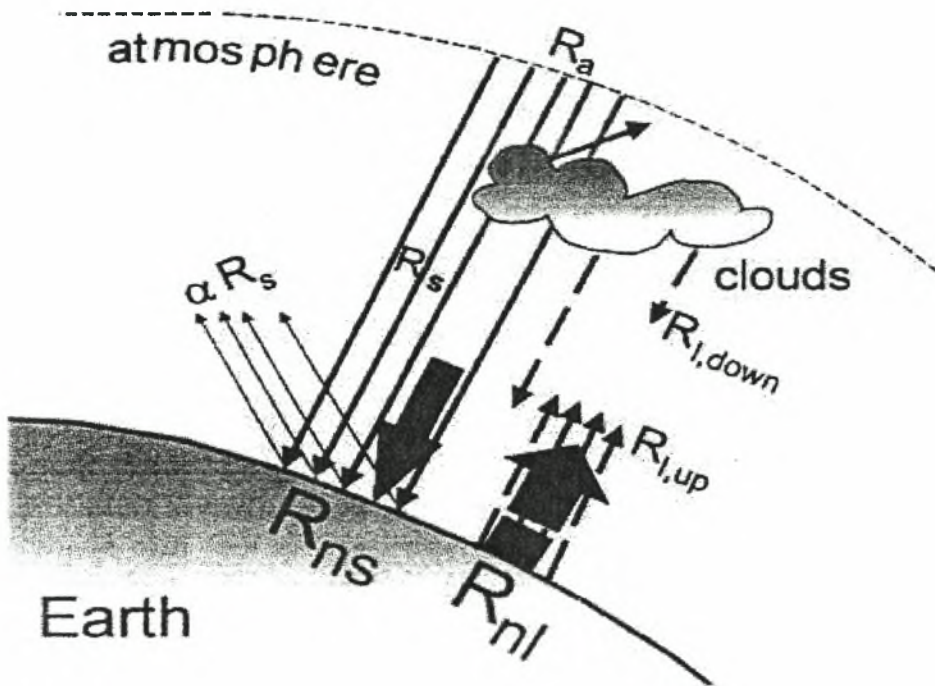
Σχήμα 3.5: Ετήσια διακύμανση των ωρών ηλιοφάνειας (N) (daylight hours) στη ζώνη του ισημερινού (Equator) 20° και 40° βόρεια και νότια για τη διάρκεια ενός έτους.

3.6.5 Συντελεστής ανακλαστικότητας (α) και καθαρή ηλιακή ακτινοβολία (R_{ns})

Ένα σημαντικό ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας η οποία φτάνει στην επιφάνεια της γης ανακλάται. Ο λόγος (α) είναι γνωστός σαν συντελεστής

ανακλαστικότητα. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στην γη καθώς και από την κλίση της επιφάνειας πρόσπτωσης. Η τιμή του κυμαίνεται από 0,90 για φρέσκο χιόνι έως 0,05 για βρεγμένο γυμνό έδαφος. Μια καλλιεργημένη έκταση την περίοδο της βλάστησης έχει (α) γύρω στο 0,20 - 0,25. Για την καλλιέργεια αναφοράς, δηλαδή το γκαζόν ο συντελεστής ανακλαστικότητας έχει την τιμή 0,23.

Η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία, (R_{ns}), είναι η ηλιακή ακτινοβολία, R_s , που δεν αντανακλάται από την επιφάνεια της γης. Η τιμή του είναι $(1-\alpha) R_s$.



Σχήμα 3.6: Διάφορες συνιστώσες της ακτινοβολίας [ατμόσφαιρα, σύννεφα, γή].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Αυτό το κεφάλαιο δείχνει πως η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς της καλλιέργειας (ET_o) καθορίζεται από μετεωρολογικά δεδομένα.

Η εξίσωση FAO Penman-Monteith είναι η μόνη μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ET_o από μετεωρολογικά δεδομένα. Η μέθοδος παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2 ενώ όλα τα δεδομένα που απαιτεί αυτή η εξίσωση παραθέτονται στο 3^ο κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορες οδηγίες για τον υπολογισμό της ET_o με διαφορετικά χρονικά βήματα που κυμαίνονται από ώρες σε μήνες, και με ελλιπή κλιματικά δεδομένα. (Παπαζαφειρίου Ζ., 1991,) Η ET_o μπορεί επίσης να εκτιμηθεί από την απώλεια νερού μέσω της εξάτμισης από μια ελεύθερη επιφάνεια νερού. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ET_o με την παραπάνω μέθοδο παρουσιάζεται σ' αυτό κεφάλαιο.

4.1 ΕΞΙΣΩΣΗ FAO PENMAN – MONTEITH

Όπως αναπτύχθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο η εξίσωση FAO Penman-Monteith είναι η εξής:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

όπου

ET_o : εξατμισοδιαπνοή αναφοράς [mm day^{-1}],

R_n : καθαρή ηλιακή ακτινοβολία [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$],

G : κατακόρυφη μεταφορά θερμότητας στ έδαφος [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$],

T : μέση θερμοκρασία αέρα σε 2 m ύψος [$^{\circ}\text{C}$],

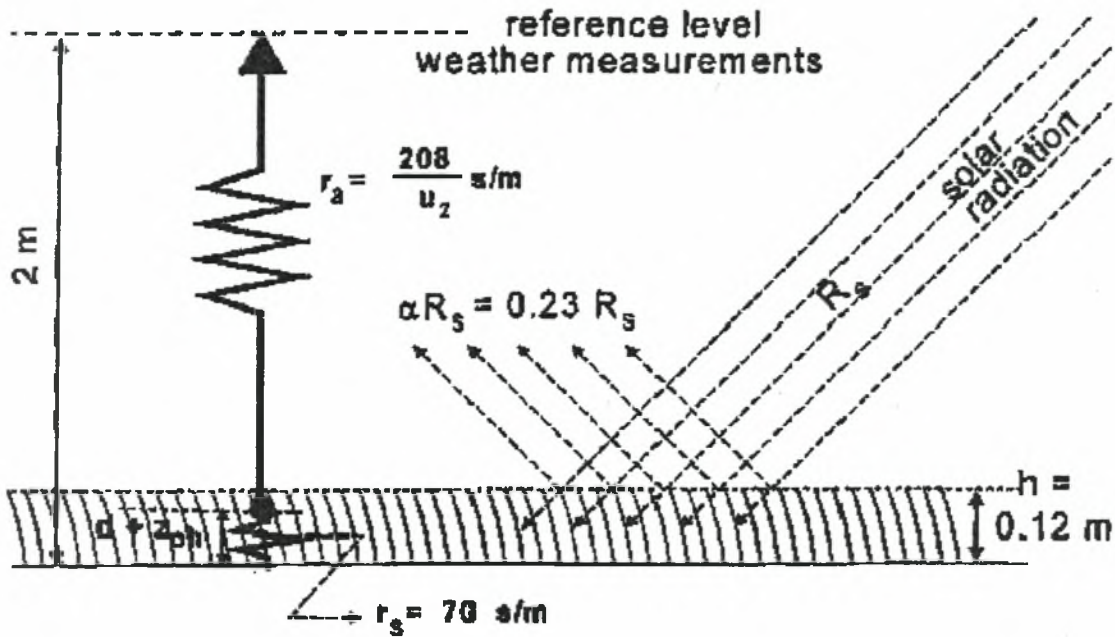
u_2 : ταχύτητα αέρα σε ύψος 2 m [m s^{-1}],

e_s : πίεση κορεσμού υδρατμών [kPa],

e_a : πραγματική πίεση υδρατμών [kPa],

$e_s - e_a$: επίδραση της υγρασίας της ατμόσφαιρας [kPa],

Δ : κλίση της γραμμής στη σχέση πίεση κορεσμού υδρατμών θερμοκρασία [kPa °C⁻¹],
 γ : ψυχρομετρική σταθερά [kPa °C⁻¹].



Σχήμα 4.1. Χαρακτηριστικά της υποθετικής καλλιέργειας αναφοράς.

Η εξίσωση FAO Penman-Monteith καθορίζει την εξατμισοδιαπνοή από μια υποθετική επιφάνεια αναφοράς (γκαζόν) και παρέχει ένα πρότυπο με το οποίο μπορούν να συγκριθούν διάφορες μετρήσεις εξατμισοδιαπνοής που ελήφθησαν σε διαφορετικές περιόδους και σε διαφορετικές περιοχές καθώς και μετρήσεις ΕΤο διαφορετικών καλλιεργειών.

4.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ

4.2.1 Φύλλο υπολογισμού

Η ΕΤο μπορεί να υπολογιστεί μέσω του φύλλου υπολογισμού που παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1. Το φύλλο υπολογισμού αναφέρεται σε πίνακες στο Παράρτημα II του (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999) για τον καθορισμό ορισμένων κλιματικών παραμέτρων. Η διαδικασία υπολογισμού απαρτίζεται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Υπολογισμός κάποιων κλιματικών παραμέτρων από την ημερήσια μέγιστη (T_{\max}) και ελάχιστη (T_{\min}) θερμοκρασία του αέρα, το

υψόμετρο και την μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m από την επιφάνεια του εδάφους (U_2).

- 2 Υπολογισμός του ελλείμματος πίεσης των υδρατμών ($e_s - e_a$). Η πίεση κορεσμού των υδρατμών (e_s) υπολογίζεται από την T_{\max} και την T_{\min} , ενώ η πραγματική πίεση των υδρατμών μπορεί να υπολογιστεί από το σημείο δρόσου (T_{dew}), από την μέγιστη (RH_{\max}) και την ελάχιστη (RH_{\min}) σχετική υγρασία ή από την μέγιστη (RH_{\max}) και την μέση (RH_{mean}) σχετική υγρασία.
- 3 Καθορισμός της καθαρής ακτινοβολίας (R_n) σαν την διαφορά μεταξύ της καθαρής μικρού μήκους (R_{ns}) και της καθαρής μεγάλου μήκους (R_{nl}) ακτινοβολίας. Στο φύλλο υπολογισμού η επίδραση της ροής εδαφικής θερμότητας (G) παραλείπεται για ημερήσιους υπολογισμούς καθώς το μέγεθος της σ' αυτή την περίπτωση είναι σχετικά μικρό. Η καθαρή ακτινοβολία, που εκφράζεται σε $MJm^{-2}d^{-1}$, μετατρέπεται σε mm/day (ισοδύναμη εξάτμιση) στην εξίσωση FAO Penman-Monteith με την χρήση ενός συντελεστή μετατροπής, του 0.408.
- 4 Η ET_o βρίσκεται τελικά συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των προηγούμενων βημάτων.

4.2.2 Αυτοματοποιημένοι υπολογισμοί

Οι υπολογισμοί της ET_o για μια επιφάνεια αναφοράς συχνά αυτοματοποιούνται. Οι διαδικασίες υπολογισμού όλων των δεδομένων που απαιτούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς με την χρήση της εξίσωσης FAO Penman-Monteith παρουσιάζονται στο 3^ο κεφάλαιο. Τυπικές ακολουθίες με τις οποίες μπορούν να γίνουν οι υπολογισμοί δίνονται στα φύλλα υπολογισμού. Οι διαδικασίες που παρουσιάζονται στους πίνακες 2 (έλλειμμα πίεσης κορεσμού), 3 (κοσμική ακτινοβολία και ώρες ηλιοφάνειας), 4 (καθαρή ακτινοβολία) και 1 (ET_o) του (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999), μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη ενός φύλλου εργασίας ή ενός προγράμματος στον υπολογιστή για τον υπολογισμό της ET_o . Πολλά προγράμματα υπολογιστών (software) κάνουν ήδη

χρήση της εξίσωσης FAO Penman-Monteith για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.

4.2.3 Υπολογισμός της ΕΤ_ο με διαφορετικά χρονικά βήματα.

Η επιλογή του χρονικού βήματος με το οποίο θα υπολογίζεται εξαρτάται από τον σκοπό υπολογισμού, από την απαιτούμενη ακρίβεια και το χρονικό βημάτων διαθέσιμων κλιματικών δεδομένων.

4.2.4 1 Δεκαήμερο ή μηνιαίο χρονικό βήμα

Παρ' όλη τη μη γραμμικότητα της εξίσωσης FAO Penman-Monteith καθώς και κάποιων μεθόδων υπολογισμού κλιματικών παραμέτρων, οι μέσες τιμές δεκαήμερων και μηνιαίων δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των αντίστοιχων μέσων δεκαήμερων και μηνιαίων τιμών της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Η τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς που υπολογίζεται με τον παραπάνω τρόπο πλησιάζει αρκετά με την αντίστοιχη μέση τιμή των καθημερινών τιμών ΕΤ_ο.

Πίνακας 1. Φύλλο υπολογισμού ET_o (FAO Penman-Monteith) με τη χρησιμοποίηση μετεωρολογικών πινάκων.

Παράμετροι					
T _{max}		°C			
T _{min}		°C	T _{mean} - (T _{max} + T _{min})/2		°C
T _{mean}		°C			kPa/°C
Υψος		m			kPa/°C
u ₂		m/s	(1 + 0.34 u ₂)		
Δ / [Δ + γ (1 + 0.34 u ₂)]					
γ / [Δ + γ (1 + 0.34 u ₂)]					
[900/(T _{mean} + 273)] u ₂					
Έλλειμμα πίεσης υδρατμού					
T _{max}		°C	e°(T _{max})		kPa
T _{min}		°C	e°(T _{min})		kPa
Πίεση υδρατμού κορεσμού e _s = [(e°(T _{max}) + e°(T _{min}))/2]					kPa
e_a προερχόμενος από τη θερμοκρασία σημείου δρόσου:					
T _{dew}		°C	e _a = e°(T _{dew})		kPa
OR e_a προερχόμενος από τη μέγιστη και ελάχιστη σχετική υγρασία:					
RH _{max}		%	e°(T _{min}) RH _{max} /100		kPa
RH _{min}		%	e°(T _{max}) RH _{min} /100		kPa
			e _a : (average)		kPa
OR e_a προερχόμενος από τη μέγιστη σχετική υγρασία:					
RH _{max}		%	e _a = e°(T _{min}) RH _{max} /100		kPa
OR e _a προερχόμενος από τη μέση σχετική υγρασία: (λιγότερο συστημένος λόγω των μη					

γραμμικότητων)					
RH _{mean}		%	$e_a = e_s RH_{mean}/100$		kPa
Έλλειμμα πίεσης υδρατμού ($e_s - e_a$)					kPa
Ακτινοβολία					
Γεωγραφικό πλάτος		°			
Ημέρα			R _a		MJ m ⁻² d ⁻¹
Μήνας			N		hours
n		ώρες	n/N		
Εάν κανένα στοιχείο ρ _s διαθέσιμο: $R_s = (0.25 + 0.50 n/N) R_a$					MJ m ⁻² d ⁻¹
$R_{so} = [0.75 + 2 (\text{Altitude})/100000] R_a$					MJ m ⁻² d ⁻¹
R _s /R _{so}					
R _{ns} = 0.77 R _s					MJ m ⁻² d ⁻¹
T _{max}			σT _{max,K⁴} =		MJ m ⁻² d ⁻¹
T _{min}			σT _{min,K⁴} =		MJ m ⁻² d ⁻¹
$(\sigma T_{max,K^4} + \sigma T_{min,K^4})/2$					MJ m ⁻² d ⁻¹
e _a		kPa	(0.34-0.14 √ e _a)		
R _s /R _{so}			(1.35 R _s /R _{so} - 0.35)		
$R_{nl} = (\sigma T_{max,K^4} + \sigma T_{min,K^4})/2 (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (1.35 R_s/R_{so} - 0.35)$					
R _n = R _{ns} - R _{nl}					
T _{month}		°C	G _{day} (assume)	0	
T _{month-1}		°C	G _{month} = 0.14 (T _{month} - T _{month-1})		
R _n - G					MJ m ⁻² d ⁻¹

$0.408 (R_n - G)$		mm/day
Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς χλοοτάπητα		
$\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \right] [0.408(R_n - G)]$		mm/day
$\left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \right] \left[\frac{900}{T + 273} \right] u_2 [(e_s - e_a)]$		mm/day
$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$		mm/day

Πίνακας 2. Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς.

ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ PENMAN ΜΟΝΤΕΙΤΗ							
Μετεωρολογικός σταθμός : CABINDA				Χώρα: Angola			
Ύψος: 20 m.				Συντεταγμένες: 5.33		Νότος	12.11 Ανατολή
Μήνας	MinTemp	MaxTemp	Σχετική Υγρασία.	Ταχυτ. ανέμου	Ηλιοφάνεια	Ακτινοβολία	ETo- PenMon
	°C	°C	%	km/day	Hours	MJ/m ² /day	mm/day
Ιανουάριος	22.8	29.6	81	78	4.0	15.7	3.4
Φεβρουάριος	22.7	30.3	82	69	4.6	16.9	3.7
Μάρτιος	23.0	30.6	80	78	5.1	17.4	3.8
Απρίλιος	23.0	30.2	82	69	5.0	16.4	3.5
Μάιος	22.0	28.6	84	69	3.8	13.5	2.9
Ιούνιος	19.2	26.5	81	69	3.3	12.2	2.6
Ιούλιος	17.6	25.1	78	78	3.2	12.3	2.6
Αύγουστος	18.6	25.3	78	78	2.6	12.4	2.6
Σεπτέμβριος	20.5	26.5	78	104	2.0	12.4	2.8
Οκτώβριος	22.5	28.0	79	130	2.2	12.9	3.1
Νοέμβριος	23.0	28.7	80	104	3.2	14.4	3.3
Δεκέμβριος	23.0	29.1	82	95	3.8	15.2	3.4
Έτος	21.5	28.2	80	85	3.6	14.3	3.1

Πίνακας 3. Έλλειμμα πίεσης κορεσμού.

Πίεση κορεσμού υδρατμών: e_s			
T_{max}	°C	$e^{\circ}(T_{max}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{max}}{T_{max} + 237.3} \right]$	kPa
T_{min}	°C	$e^{\circ}(T_{min}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right]$	kPa
Πίεση κορεσμού υδρατμών $e_s = [e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})]/2$			kPa
Πραγματική πίεση υδρατμών: e_a			
1. e_a προερχόμενος από τη θερμοκρασία σημείου δρόσου			
T_{dew}	°C	$e_a = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right]$	kPa
OR 2. e_a προερχόμενος από τη μέγιστη και ελάχιστη σχετική υγρασία			
RH_{max}	%	$e^{\circ}(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100}$	kPa
RH_{min}	%	$e^{\circ}(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}$	kPa
$e_a = [e^{\circ}(T_{min}) RH_{max}/100 + e^{\circ}(T_{max}) RH_{min}/100]/2$			kPa
OR 3. e_a προερχόμενος από τη μέγιστη σχετική υγρασία (σφάλμα RH_{min})			
RH_{max}	%	$e_a = e^{\circ}(T_{min}) RH_{max}/100$	kPa
OR 4. e_a προερχόμενος τη μέση σχετική υγρασία (δε συνιστάται)			
RH_{mean}	%	$e_a = e_s (RH_{mean})/100$	kPa
Έλλειμμα πίεσης υδρατμών: $(e_s - e_a)$			kPa

Πίνακας 4. Κοσμική ακτινοβολία και ώρες ηλιοφάνειας.

Γεωγραφικό πλάτος				
Οι βαθμοί και τα λεπτά είναι + θετικό για το βόρειο ημισφαίριο- αρνητικός για το νότιο ημισφαίριο				
Βαθμοί		°	----->	°
Λεπτά		□	-----/60----->	°
Δεκαδικοί βαθμοί = άθροισμα(βαθμοί + λεπτά/60)				°
□ = □ /180*[δεκαδικοί βαθμοί]				rad
Ημέρα του έτους				
Ημέρα				
Μήνας			J Table 2.5 (Annex 2)	
$d_r = 1 + 0.033 \cos(2 \square J/365)$				
$\square = 0.409 \sin(2 \square J/365 - 1.39)$				rad
$\sin(\square)\sin(\square)$				
$\cos(\square)\cos(\square)$				
$\square_s = \arccos[-\tan(\square)\tan(\square)]$				rad
$(24(60)/\square G_{sc}$			37.59	$MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$
Κοσμική ακτινοβολία: R_a				
$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$ Eq. 21				$MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$
Διάρκεια μέρας σε ώρες: N				
$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$				hour/day

Πίνακας 5. Καθαρή ακτινοβολία.

Καθαρή ηλιακή ακτινοβολία: R_{ns}			
Εάν το n μετράται αντι της R_s :			
$R_s = (0.25 + 0.50 \, n/N) R_a$			$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
$R_{so} = [0.75 + 2 \, (\text{Altitude})/100000] R_a$			$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
$R_s/R_{so} (\leq 1.0)$			
$R_{ns} = 0.77 R_s$			$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Καθαρή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία: R_{nl} με $\sigma = 4.903 \, 10^{-9} \, \text{MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ και $T_K = T[^\circ\text{C}] + 273.16$			
T_{\max}	$^\circ\text{C}$	$T_{\max, K} = T_{\max} + 273.16$	K
T_{\min}	$^\circ\text{C}$	$T_{\min, K} = T_{\min} + 273.16$	K
		$\sigma T_{\max, K^4} =$	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
		$\sigma T_{\min, K^4} =$	$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
$(\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4})/2$			$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
e_a	kPa	$(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a})$	
R_s/R_{so}		$(1.35 R_s/R_{so} - 0.35)$	
$R_{nl} = (\sigma T_{\max, K^4} + \sigma T_{\min, K^4})/2 (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (1.35 R_s/R_{so} - 0.35)$			$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Καθαρή ακτινοβολία: R_n			
$R_n = R_{ns} - R_{nl} \text{ Eq. 40}$			$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

ΜΟΝΟΣ ΦΥΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ K_c

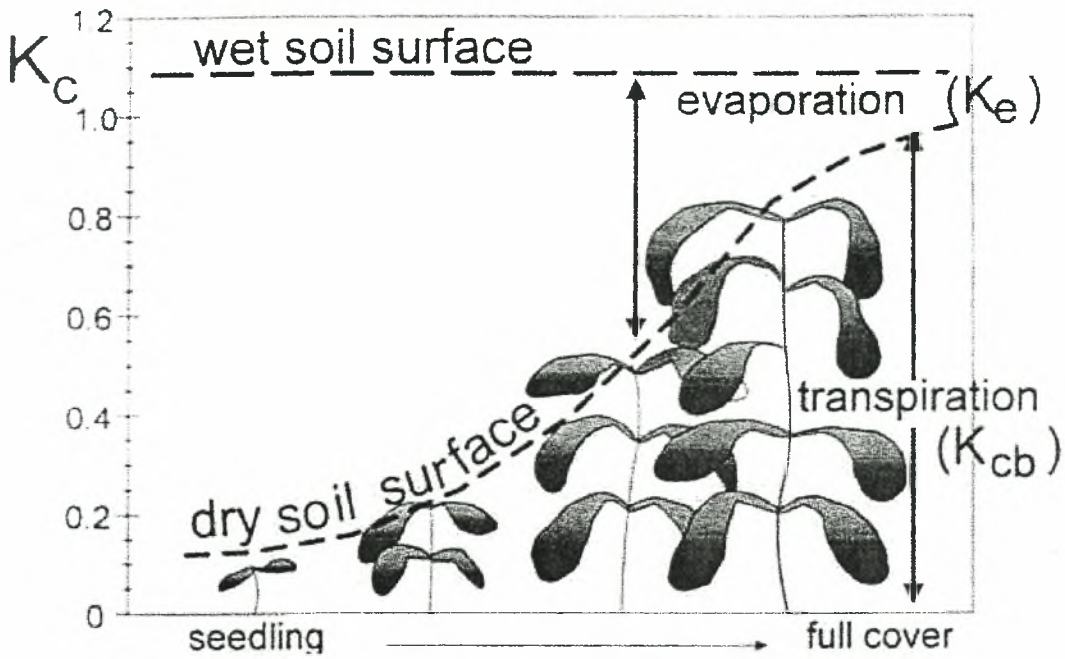
Αυτό το κεφάλαιο αναφέρεται στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής των φυτών (ET_0) σε κανονικές συνθήκες. Επομένως δεν υπάρχουν περιορισμοί για την ανάπτυξη της καλλιέργειας, την εξατμισοδιαπνοή του εδαφικού νερού, την αλατότητα του εδάφους, την πυκνότητα των φυτών της καλλιέργειας, για διάφορες επιδημίες και ασθένειες ή ζιζάνια. Η ET_c καθορίζεται από το γινόμενο του φυτικού συντελεστή K_c επί την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_0 :

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad (5.1)$$

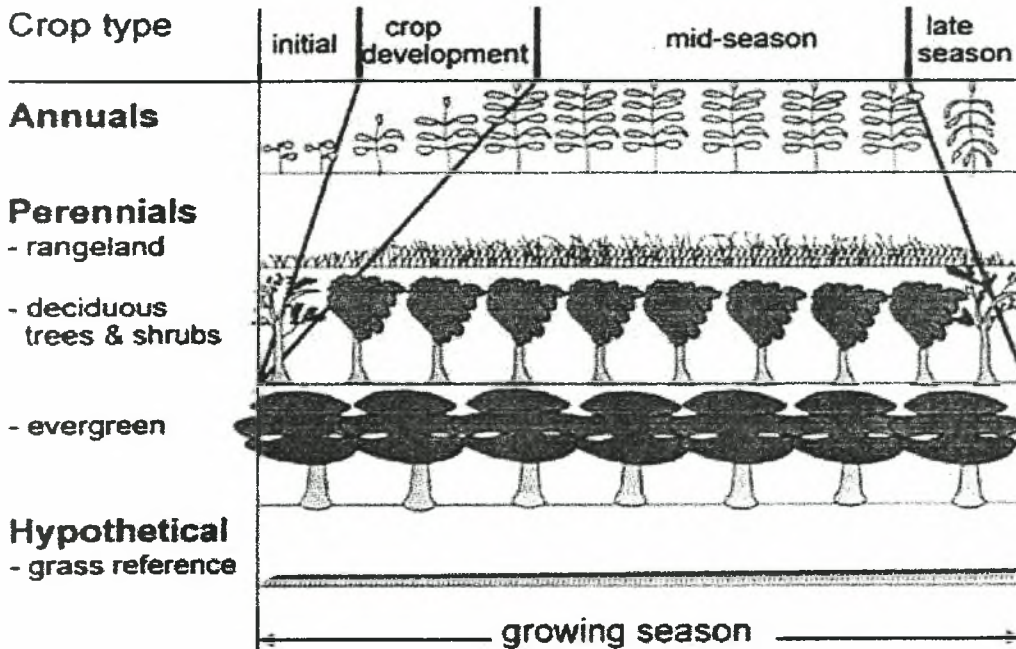
Το αποτέλεσμα της φυτικής διαπνοής και της εξάτμισης από το έδαφος, αποτυπώνονται στο μονό φυτικό συντελεστή. Ο συντελεστής K_c ενσωματώνει τα φυτικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα και τις συνέπειες της εξάτμισης από τον αγρό. Για τον σχεδιασμό ενός φυσιολογικού αρδευτικού σχεδίου καθώς και για τους σκοπούς διαχείρισης του υδατικού δυναμικού, για την ανάπτυξη βασικών αρδευτικών προγραμμάτων και για τις περισσότερες ορθολογικές υδρολογικές μελέτες, οι μέσες τιμές φυτικών συντελεστών είναι περισσότερο αντιπροσωπευτικές και πρακτικές από το K_c υπολογισμένο σε ημερήσιο χρονικό βήμα, χρησιμοποιώντας χωριστά ένα φυτικό συντελεστή και ένα συντελεστή εδάφους. Μόνο όταν απαιτούνται τιμές K_c σε ημερήσια βάση για ειδικούς αγρούς με ειδικές καλλιέργειες και για συγκεκριμένες χρονιές, τότε πρέπει ο συντελεστής διαπνοής και εξάτμισης ($K_{cb}+K_e$) να εξετάζονται χωριστά.

Η διαδικασία υπολογισμού της φυτικής εξατμισοδιαπνοής ET_c , αποτελείται από τις παρακάτω διαδικασίες:

1. Προσδιορισμός των φυτικών σταδίων ανάπτυξης, καθορισμός των μηκών τους και επιλογή των αντίστοιχων K_c συντελεστών.
2. Προσαρμογή των επιλεγμένων K_c συντελεστών για κάθε στάδιο.
3. Κατασκευή της καμπύλης του φυτικού συντελεστή, και
4. Υπολογισμός της ET_c , σαν γινόμενο των ET_0 και K_c .



Σχήμα 5.1: Η επίδραση της εξετησιοδιαπνοής στον K_c όταν το έδαφος είναι συνεχώς υγρό. Η καμπύλη αναπαριστά τον K_c όταν το έδαφος είναι ξηρό αλλά η καλλιέργεια δέχεται αρκετό νερό ώστε να διατηρεί τη δαπνοή.

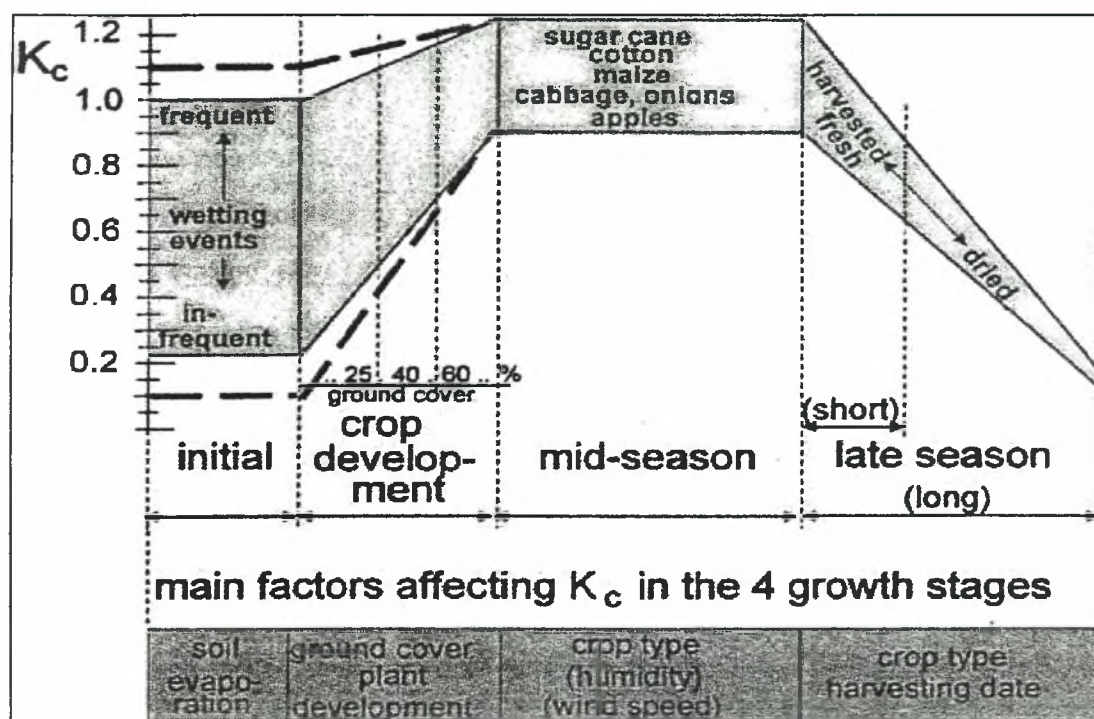


Σχήμα 5.2: Στάδια ανάπτυξης καλλιέργειας για διάφορα είδη καλλιεργειών.

5.1 Η ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Η άρδευση και στράγγιση κατά FAO περιγράφει γενικά 4 ξεκάθαρα στάδια ανάπτυξης και τη συνολική περίοδο ανάπτυξης για ποικίλους τύπους κλιμάτων και τοποθεσιών.

Σε μερικές περιπτώσεις, ο χρόνος της βλάστησης και ο χρόνος της ταχείας ανάπτυξης, μπορεί να προβλέπεται, χρησιμοποιώντας αθροιστικές βαθμονομημένες εξισώσεις ή από περίπλοκα μοντέλα ανάπτυξης του φυτού. Αυτοί οι τύποι μοντέλων θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικοί για κάθε περιοχή ή κάθε ποικιλία, χρησιμοποιώντας τοπικές παρατηρήσεις.



Σχήμα 5.3: Τυπικές τιμές για τον συντελεστή K_c στα τέσσερα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας.

5.1.1 Αρχική πηγή: Η άρδευση και στράγγιση κατά FAO

Τα μήκη αρχικών περιόδων και περιόδων ανάπτυξης μπορεί να είναι σχετικά μικρά για φυλλοβόλα δέντρα και θάμνους, τα οποία μπορούν να αναπτύξουν νέα φύλλα την άνοιξη, με σχετικά γρήγορους ρυθμούς.

Ο ρυθμός κατά τον οποίο, το φυτό αναπτύσσεται και ο χρόνος κατά τον οποίο επιτυγχάνεται αποτελεσματικά πλήρης κάλυψη του εδάφους, επηρεάζονται γενικά από τις καιρικές συνθήκες και συγκεκριμένα από τη μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα. Επομένως, η διάρκεια του χρόνου

μεταξύ του φυτέματος/σποράς και της πλήρους κάλυψης του εδάφους θα ποικίλλει ανάλογα με το κλίμα, με το γ.π., με το ύψος και την ημερομηνία φύτευσης/σποράς. Ποικίλλει επίσης ανάλογα με την καλλιέργεια (ποικιλία). Γενικά, η μοναδική αποτελεσματική πλήρης κάλυψη για ένα φυτό και ο ρυθμός της φαινολογικής ανάπτυξης (άνθιση, ανάπτυξη, ωρίμανση και γηρασμός) εξαρτάται περισσότερο από το γενότυπο του φυτού και λιγότερο από κλιματικούς παράγοντες.

Το τέλος της μέσης περιόδου και η αρχή της τελευταίας χαρακτηρίζεται συνήθως από γηρασμό των φύλλων ξεκινώντας συχνά με τα παλαιότερα φύλλα του φυτού. Η διάρκεια της τελευταίας περιόδου μπορεί να είναι σχετικά μικρή (λιγότερο από 10 ημέρες), για βλάστηση νεκρωμένη από το κρύο (για παράδειγμα, το καλαμπόκι σε μεγάλα ύψη σε γ.π. $>40^{\circ}\text{N}$) ή για αγροτικές παραγωγές που συγκομίζονται νωπές (για παράδειγμα, τα επιτραπέζια παντζάρια και τα μικρά λαχανικά).

Υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν την ωρίμανση και τον γηρασμό της καλλιέργειας. Μεγάλη διάρκεια υψηλής θερμοκρασίας αέρα ($>35^{\circ}\text{C}$) μπορεί να ξηράνει μέρος της καλλιέργειας. Εάν ιδιαιτέρως οι υψηλές θερμοκρασίες συμπίπτουν με αντίστοιχες υψηλές τιμές υγρασίας, τότε π.χ. το γρασίδι μπορεί να μην αναπτυχθεί άλλο για το υπόλοιπο της καλλιεργητικής περιόδου. Η υγρασία ή το περιβαλλοντικό στρες επιταχύνουν συνήθως το ρυθμό ωρίμανσης της καλλιέργειας και μπορεί να μειώσουν την μεσαία και τελικό στάδιο ανάπτυξης.

5.2 ΦΥΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ (K_{cini})

5.2.1 Υπολογιστική διαδικασία

Οι τιμές για το K_{cini} στον πίνακα 5.1 είναι μόνο προσεγγίσεις και πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο για υπολογισμούς του ET_c κατά τη διάρκεια προκαταρκτικών ή πρόχειρων υπολογισμών. Για διάφορους τύπους μόνο μία τιμή για K_{cini} θεωρείται ότι είναι αντιπροσωπευτική από όλο το γκρουπ, για μια τυπική μελέτη διαχείρισης νερού.

Πίνακας 5.1: Μονοί φυτικοί συντελεστές K_c , και μέσα ύψη διαφόρων φυτών για μη στρεσαρισμένες, κακοδιαχειρισμένες καλλιέργειες σε υπό-υγρά κλίματα ($RH_{min}=45\%$), για χρήση στην εξίσωση FAO Penman-Monteith.

Καλλιέργεια	K_{cini}^1	$K_{c mid}$	$K_{c end}$	Μέγιστο Ύψος (h) Καλλιέργειας (m)
A. Χαμηλά κηπευτικά	0.7	1.05	0.95	
Μπρόκολο		1.05	0.95	0.3
Λαχανάκι Βρυξελλών		1.05	0.95	0.4
Λάχανο		1.05	0.95	0.4
Καρότα		1.05	0.95	0.3
Κουνουπίδι		1.05	0.95	0.4
Σέλινο		1.05	1.00	0.6
Σκόρδο		1.00	0.70	0.3
Μαρούλι		1.00	0.95	0.3
Κρεμμύδια				
- Ξερά		1.05	0.75	0.4
- Χλωρά		1.00	1.00	0.3
- Για σπόρο		1.05	0.80	0.5
Σπανάκι		1.00	0.95	0.3
Ρεπανάκια		0.90	0.85	0.3
B. Λαχανικά οικογένεια Σολανοειδών (Solanaceae)	0.6	1.15	0.80	
Μελιτζάνα		1.05	0.90	0.8
Πτεριά		1.05 ²	0.90	0.7
Ντομάτα		1.15 ²	0.70-0.90	0.6
Γ. Λαχανικά οικογένειας Κολοκυνθοειδών (Cucurbitaceae)	0.5	1.00	0.80	
Πεπόνι	0.5	0.85	0.60	0.3
Αγγούρι				
- Φρέσκο	0.6	1.00 ²	0.75	0.3
- Συγκομιδή μηχανική	0.5	1.00	0.90	0.3
Κολοκύθα		1.00	0.80	0.4
Κολοκυθάκι		0.95	0.75	0.3

Καρπούζι	0.4	1.00	0.75	0.4
Δ. Κονδυλόριζα	0.5	1.10	0.95	
Παντζάρια		1.05	0.95	0.4
Γλυκοπατάτα		1.15	0.75	0.6
Ζαχαρότευτλο	0.35	1.20	0.70	0.5
Ε. Ψοπρια (<i>Leguminosae</i>)	0.4	1.15	0.55	
Φασόλια, Χλωρά	0.5	1.05 ²	0.90	0.4
Μπιζέλι		1.00	0.35	0.4
Αραχίδα		1.15	0.60	0.4
Φακή		1.10	0.30	0.5
Αρακάς				
- Φρέσκα	0.5	1.15 ²	1.10	0.5
- Ξερά/σπόρος		1.15	0.30	0.5
Σόγια		1.15	0.50	0.5-1.0
ΣΤ. Πολυετή λαχανικά	0.5	1.00	0.80	
Αγκινάρες	0.5	1.00	0.95	0.7
Σπαράγγι	0.5	0.95 ⁷	0.30	0.2-0.8
Μέντα	0.60	1.15	1.10	0.6-0.8
Φράουλες	0.40	0.85	0.75	0.2
Ζ. Ινοδωτικά φυτά	0.35			
Βαμβάκι		1.15-1.20	0.70-0.50	1.2-1.5
Λινάρι		1.10	0.25	1.2
Η. Ελαιοδωτικά Φυτά	0.35	1.15	0.35	
Ρετσίνολαδιά		1.15	0.55	0.3
Συναπόσπορος		1.0-1.15 ⁹	0.35	0.6
Σουσάμι		1.10	0.25	1.0
Ηλίανθος		1.0-1.15 ⁹	0.35	2.0
Θ. Δημητριακά	0.3	1.15	0.4	
Κριθάρι		1.15	0.25	1
Βρώμη		1.15	0.25	1
Ανοιξιότικα Σιτηρά		1.15	0.25-0.4	1

Χειμερινά Σιτηρά				
- με παγωνιά	0.4	1.15	0.25-0.4	1
- χωρίς παγωνιά	0.7	1.15	0.25-0.4	
Αραβόσποτος,		1.20	0.60-0.35 ¹¹	2
Αραβόσποτος, γλυκός		1.15	1.05 ¹²	1.5
Κεχρί		1.00	0.30	1.5
Σόργο				
- Γρασίδι		1.00-1.10	0.55	1-2
- γλυκός		1.20	1.05	2-4
Ρύζι	1.05	1.20	0.90-0.60	1
Ι. Κτηνοτροφικά φυτά				
Μηδική				
- μέσης περιόδου	0.40	1.20	1.15	0.7
- για το σπόρο	0.40	0.50	0.50	0.7
Τριφύλλι				
- μέσης περιόδου	0.40	0.90 ¹³	0.85	0.6
- μεταξύ κοπών	0.40 ¹⁴	1.15 ¹⁴	1.10 ¹⁴	0.6
Λιβάδια (Λειμνώνες)				
- Βοσκή	0.40	0.85-1.05	0.85	0.15-0.30
- Εκτενής βοσκή	0.30	0.75	0.75	0.10
Κ. Ζαχαροκάλαμο	0.40	1.25	0.75	3
Λ. Τροπικά φρούτα και δέντρα				
Μπανάνα				
- 1 έτος	0.50	1.10	1.00	3
- 2 έτος	1.00	1.20	1.10	4
Κακαόδενδρο	1.00	1.05	1.05	3
Καφεόδενδρο				
- χωρίς επίγεια κάλυψη	0.90	0.95	0.95	2-3
- με τα ζιζάνια	1.05	1.10	1.10	2-3
Φοίνικες	0.95	1.00	1.00	8

Ανανάς				
- γυμνό έδαφος	0.50	0.30	0.30	0.6-1.2
- με την κάλυψη χλόης	0.50	0.50	0.50	0.6-1.2
Μαστιχόδενδρα	0.95	1.00	1.00	10
Τσάι				
- μη-σκιασμένος	0.95	1.00	1.00	1.5
- σκιασμένος	1.10	1.15	1.15	2
Μ. Σταφύλια και μούρα				
Μούρα (θάμνοι)	0.30	1.05	0.50	1.5
Σταφύλια				
- Επιτραπέζια ή σταφίδα	0.30	0.85	0.45	2
- Κρασί	0.30	0.70	0.45	1.5-2
Λυκίσκοι	0.3	1.05	0.85	5
Ν. Οπορωφόρα δέντρα				
Αμύγδαλα, καμία επίγεια κάλυψη	0.40	0.90	0.65 ¹⁸	5
Μήλα, κεράσια, αχλάδια				
- καμία επίγεια κάλυψη, παγετός	0.45	0.95	0.70 ¹⁸	4
- καμία επίγεια κάλυψη, κανένας παγετός	0.60	0.95	0.75 ¹⁸	4
- ενεργός επίγεια κάλυψη, παγετός	0.50	1.20	0.95 ¹⁸	4
- ενεργός επίγεια κάλυψη, κανένας παγετός	0.80	1.20	0.85 ¹⁸	4
Βερίκοκα, ροδάκινα, Πυρινόκαρπα				
- καμία επίγεια κάλυψη, παγετός	0.45	0.90	0.65 ¹⁸	3
- καμία επίγεια κάλυψη, κανένας παγετός	0.55	0.90	0.65 ¹⁸	3
- ενεργός επίγεια κάλυψη, παγετός	0.50	1.15	0.90 ¹⁸	3
- ενεργός επίγεια κάλυψη, κανένας παγετός	0.80	1.15	0.85 ¹⁸	3
Αβοκάντο, καμία επίγεια κάλυψη	0.60	0.85	0.75	3
Εσπεριδοειδή, καμία επίγεια κάλυψη				
- 70% κάλυψη	0.70	0.65	0.70	4

- 50% κάλυψη	0.65	0.60	0.65	3
- 20% κάλυψη	0.50	0.45	0.55	2
Εσπεριδοειδή, με την ενεργά επίγεια κάλυψη ή τα ζιζάνια				
- 70% κάλυψη	0.75	0.70	0.75	4
- 50% κάλυψη	0.80	0.80	0.80	3
- 20% κάλυψη	0.85	0.85	0.85	2
Κωνοφόρα	1.00	1.00	1.00	10
Ακτινίδιο	0.40	1.05	1.05	3
Ελιές	0.65	0.70	0.70	3-5
Φιστικιά, καμία επίγεια κάλυψη	0.40	1.10	0.45	3-5
Καρυδιά	0.50	1.10	0.6518	4-5

5.3 ΧΡΟΝΙΚΑ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΑΡΔΕΥΣΕΩΝ

Η εξατμισοδιαπνοή κατά τη διάρκεια του αρχικού σταδίου για ετήσιες καλλιέργειες εντοπίζεται κυρίως με τη μορφή της εξάτμισης. Επομένως, ακριβείς εκτιμήσεις για το K_{cini} θα πρέπει να γίνονται με βάση τη συχνότητα με την οποία η εδαφική επιφάνεια υγραίνεται κατά την πρώτη περίοδο. Εκεί που το έδαφος υγραίνεται συχνά από την άρδευση ή τη βροχή, η εξάτμιση από την εδαφική επιφάνεια μπορεί να είναι σημαντική και το K_{cini} θα είναι μεγάλο. Από την άλλη πλευρά, εκεί που η εδαφική επιφάνεια είναι ξηρή, η εξάτμιση περιορίζεται και το K_{cini} θα είναι μικρό, (Frevert, D.K., Hill, R.W. and Braaten, B.C., 1983)

5.3.1 Εξάτμιση από την ατμόσφαιρα

Η τιμή του K_{cini} επηρεάζεται από την εξάτμιση στην ατμόσφαιρα, π.χ. ET_o . Όσο πιο μεγάλη η εξάτμιση στην ατμόσφαιρα, τόσο πιο γρήγορα το έδαφος ξεραίνεται ανάμεσα στις εφαρμογές αρδευτικού νερού και τόσο μικρότερος ο κατά μέσο όρο χρόνος που το K_c θα είναι σταθερό για οποιαδήποτε συγκεκριμένη περίοδο.

5.3.2 Η σπουδαιότητα του γεγονότος άρδευσης

Το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που το εδαφικό νερό αρχίζει να ανέρχεται στην επιφάνεια του εδάφους μέχρι να εξατμιστεί και να

στεγνώσει η εδαφική επιφάνεια είναι πολύ σημαντικό να το γνωρίζουμε. Εξαρτώμενο από τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των αρδεύσεων, από το μέγεθος της άρδευσης και από την εξάτμιση της ατμόσφαιρας, το K_{cini} μπορεί να ποικίλλει μεταξύ του 0.1 και 1,15.

5.3.3 Χρονικά διαστήματα μεταξύ των αρδεύσεων

Γενικά, το μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ των αρδεύσεων εκτιμάται υπολογίζοντας όλη την βροχόπτωση και την άρδευση που λαμβάνουν χώρα κατά την πρώτη περίοδο. Οι διυγράνσεις που λαμβάνουν χώρα σε συνεχόμενες ημέρες μπορούν να υπολογιστούν σαν μια ενιαία άρδευση. Το μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ των αρδεύσεων εκτιμάται διαιρώντας το μήκος της αρχικής περιόδου με τον αριθμό των αρδεύσεων.

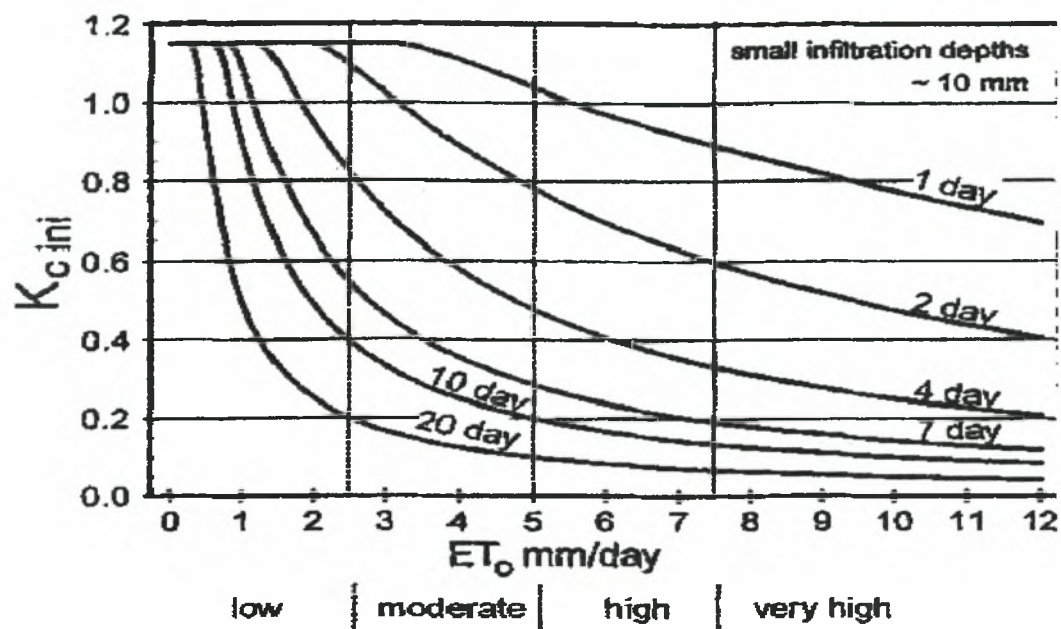
Εκεί που μόνο οι μηνιαίες τιμές βροχοπτώσεων είναι διαθέσιμες χωρίς καμία πληροφορία για τον αριθμό των ημερήσιων τιμών βροχόπτωσης, ο αριθμός των αρδεύσεων εντός του μήνα μπορεί να εκτιμηθεί διαιρώντας το ενιαίο βάθος βροχόπτωσης με το βάθος μιας τυπικής βροχής. Το τυπικό βάθος, εάν υπάρχει, μπορεί να ποικίλλει πολύ από κλίμα σε κλίμα, από περιοχή σε περιοχή και από εποχή σε εποχή. Ο πίνακας 5.2 παρουσιάζει μερικές πληροφορίες πάνω στο εύρος των βαθών βροχόπτωσης. Αφού αποφασίσουμε ποια βροχόπτωση είναι τυπική για την περιοχή και τη χρονική περίοδο, ο αριθμός των βροχερών μερών και η μέση απόσταση άρδευσης μπορούν εύκολα να εκτιμηθούν, (Allen , R.G. and Pruitt, W.O., 1991, FAO - 24)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 Ταξινόμηση των βαθών βροχοπτώσεων

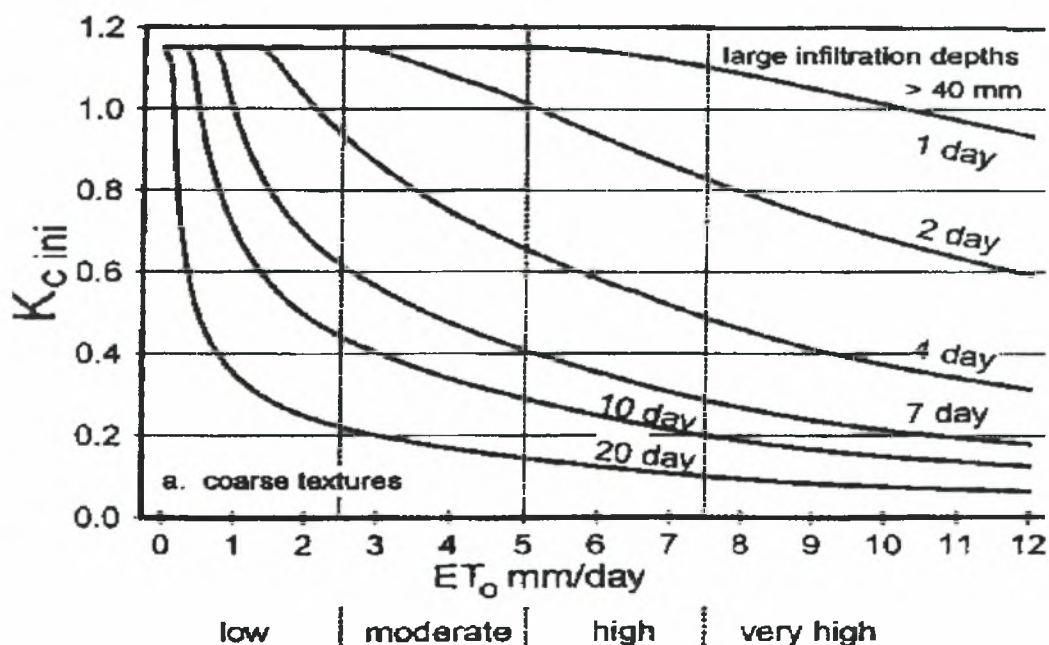
Βροχή	Βάθος
Ψηλή βροχή	< 3 mm
Ελαφριά	>5 mm
Μεσαία μπόρα	>10 mm
Καταιγίδα	> 40 mm

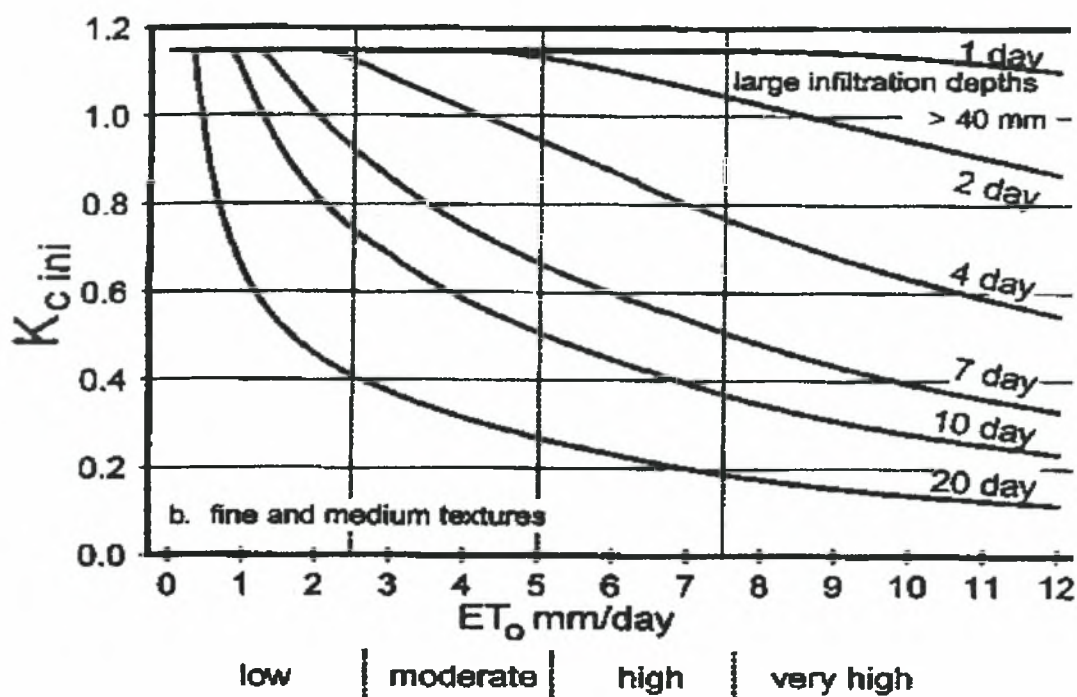
Εκεί που η βροχόπτωση είναι ανεπαρκής, η άρδευση χρειάζεται να διατηρεί την καλλιέργεια σε καλή υδατική κατάσταση. Ακόμα και εκεί που η άρδευση δεν είναι ακόμα αναπτυγμένη, η μέση απόσταση μεταξύ των μελλοντικών αρδεύσεων θα πρέπει να εκτιμηθεί ώστε να λαμβάνει τη ζητούμενη συχνότητα

της ανάγκης σε υγρασία έτσι ώστε να μη καταπονείται από έλλειψη νερού η καλλιέργεια μας. Το χρονικό διάστημα πρέπει να κυμαίνεται από λίγες μέρες για μικρά λαχανικά, έως πάνω από μία εβδομάδα ή περισσότερο για δημητριακά και εξαρτάται από κλιματικούς παράγοντες.



Σχήμα 5.4: Μέσος $K_{c\ ini}$ συσχετιζόμενος με το επίπεδο της ET_0 , χαμηλό (low), μέσο (moderate), υψηλό (high), πολύ υψηλό (very high) και το διάστημα μεταξύ των αρδεύσεων και/ή σημαντική βροχόπτωση κατά τη διάρκεια του αρχικού σταδίου ανάπτυξης για όλους τους τύπους εδαφών όταν η άρδευση είναι ελαφριά έως μέτρια.





Σχήμα 5.5: Μέσος K_{cini} που σχετίζεται με την εξίσωση του ET_0 και με τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των αρδεύσεων μεγαλύτερος ή ίσος με 40mm ανά άρδευση, κατά το αρχικό στάδιο ανάπτυξης για α) ελαφριά εδάφη και β) συνεκτικά εδάφη.

5.3.4 Επιφανειακή άρδευση και τεχνητή βροχή: (βάθος διήθησης 40mm ή περισσότερο):

Το σχήμα 5.5 χρησιμοποιείται για βαριές διυγράνσεις όταν τα βάθη διήθησης είναι μεγαλύτερα από 40 mm, όπως αυτά που έχουμε όταν η άρδευση προέρχεται από την περιοδική άρδευση, από τεχνητή βροχή ή από επιφανειακή άρδευση. Συνεπώς, ο μέσος συντελεστής K_c είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για ελαφριές υγράνσεις. Ο χρόνος που χρειάζεται η εδαφική επιφάνεια για να στεγνώσει, εκτός από την εξάτμιση και τη συχνότητα άρδευσης, καθορίζεται επίσης από την ικανότητα αποθήκευσης στην επιφάνεια του εδάφους.

Το σχήμα 5.5α χρησιμοποιείται για αμμώδη εδάφη και το σχήμα 5.5β χρησιμοποιείται για συνεκτικά. Ελαφριά εδάφη είναι τα αμμώδη και πηλοαμμώδη. Τα πηλώδη εδάφη περιλαμβάνουν τα αμμοπηλώδη, πηλώδη, ιλοπηλώδη και ιλυώδη εδάφη. Τα συνεκτικά εδάφη περιλαμβάνουν ιλοαργιλοπηλώδη, ιλοαργιλώδη και αργιλώδη εδάφη.

5.3.5 Μέση άρδευση (βάθος διήθησης μεταξύ 10 και 40mm)

Εκεί που τα βάθη διήθησης είναι μεταξύ 10 και 40 mm, η τιμή του K_c μπορεί να

εκτιμηθεί από τα σχήματα 5.4 και 5.5:

$$k_{cni} = k_{cni(\sigma\chi.5.4)} + \frac{(I-10)}{(40-10)} [k_{cni(\sigma\chi.5.5)} - k_{cni(\sigma\chi.5.4)}] \quad (5.2)$$

όπου

$K_{c\ ini}$ (Σχ. 5.4) τιμή για $K_{c\ ini}$ από Σχήμα 5.4,

$K_{c\ ini}$ (Σχ. 5.5) τιμή για $K_{c\ ini}$ από Σχήμα 5.5,

I μέσο βάθος διήθησης [mm].

Οι τιμές 10 και 40 στην εξίσωση είναι τα μέσα βάθη της διήθησης (χιλιοστόμετρα) στα οποία τα σχήματα 5.4 και 5.5 είναι βασισμένα.

5.3.6 Ρύθμιση για μερική διύγρανση από άρδευση

Πολλοί τύποι αρδευτικών συστημάτων διαβρέχουν μόνο ένα μέρος της εδαφικής επιφάνειας. Για παράδειγμα, για ένα στάγδην αρδευτικό σύστημα, το ποσοστό της επιφάνειας που διυγράνθηκε, f_w , μπορεί να είναι μόνο 0,4. Για αρδευτικά συστήματα με αυλάκια, το ποσοστό της επιφάνειας που διυγράνθηκε μπορεί να κυμαίνεται από 0,3 ως 0,8, (Σακελλαρίου, 2003). Μόνο όταν η εδαφική επιφάνεια υγράνθηκε από στάγδην, τότε η τιμή του K_c λαμβάνεται από τον πίνακα 5.2 ή από τα σχήματα 5.4 ή 5.5.

$$K_{c\ ini} = f_w K_{c\ ini} \quad (5.3)$$

Όπου f_w : ποσοστό διαβρεχόμενης επιφάνειας από άρδευση ή βροχή (0-1)

K_{cini} : η τιμή για το K_{cini} από τον πίνακα 5.1.

Επιπροσθέτως, επιλέγοντας ποιο σχήμα θα χρησιμοποιηθεί (π.χ. σχήματα 5.4 ή 5.5), το μέσο βάθος διήθησης, εκφραζόμενο σε χιλιοστά σε ολόκληρη την επιφάνεια του αγρού, θα πρέπει να διαιρείται από το f_w ώστε να παρουσιάζει το αληθινό βάθος διήθησης του νερού για το τμήμα της επιφάνειας που διυγράνθηκε (σχήμα 5.6):

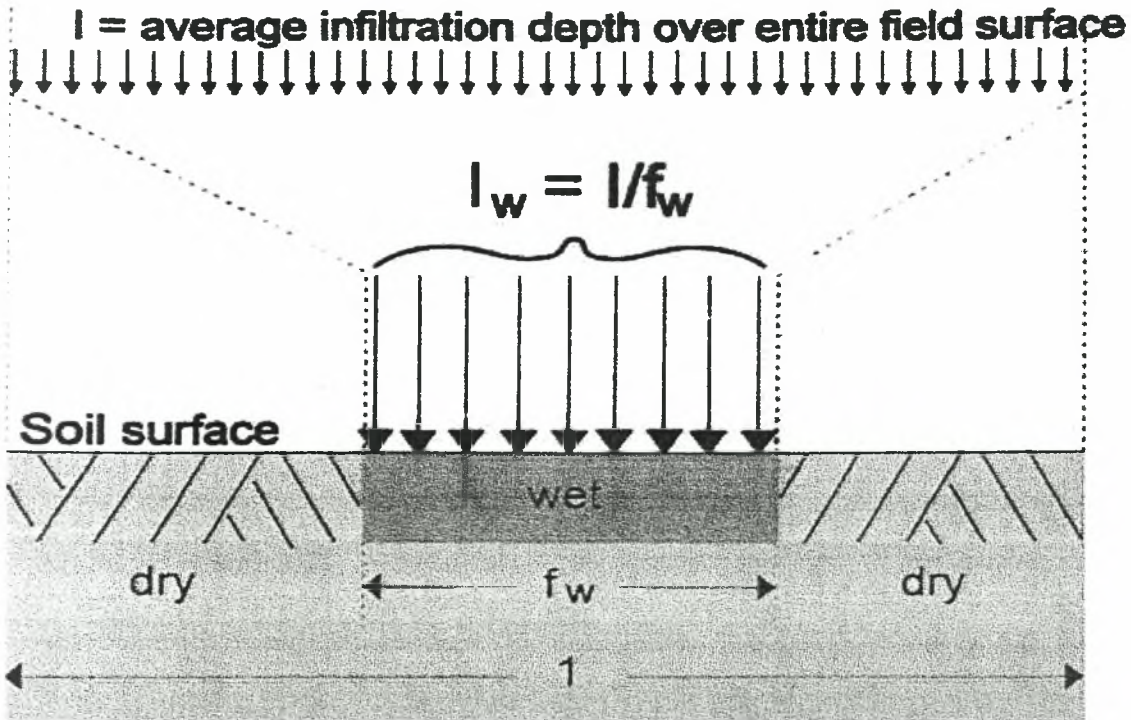
$$I_w = I / f_w \quad (5.4)$$

Όπου I_w : βάθος άρδευσης για το τμήμα της επιφάνειας που διυγράνθηκε (mm)

f_w : επιφάνεια που διυγράνθηκε με στάγδην άρδευση

I : το βάθος άρδευσης για τον αγρό. (mm)

Όταν η άρδευση ενός τμήματος εδαφικής επιφάνειας και η βροχόπτωση πάνω σε όλη την εδαφική επιφάνεια, λαμβάνουν χώρα κατά την αρχική περίοδο, τότε το f_w θα έπρεπε να είναι ο μέσος όρος του f_w για κάθε τύπο άρδευσης, σύμφωνα με το ολικό βάθος διήθησης, λαμβανόμενο από κάθε τύπο.



Σχήμα 5.6: Μερική διύγνωση με άρδευση.

5.3.7 K_{cni} για δέντρα και θάμνους

Το K_{cni} για δέντρα και θάμνους θα πρέπει να εκφράζει την κατάσταση του εδάφους πριν από την εμφάνιση των φύλλων στην περίπτωση των φυλλοβόλων δέντρων ή θάμνων, και την κατάσταση του εδάφους κατά την περίοδο βραδείας ανάπτυξης για τα αειθαλή δέντρα και θάμνους. Το K_{cni} εξαρτάται από την κάλυψη από χόρτα ή ζιζάνια, από την συχνότητα άρδευσης του εδάφους και από την πυκνότητα των δέντρων. Το K_{cni} για οπωρώνα με αειθαλή δένδρα για την περίοδο λαθάργου έχει μικρότερη απόκλιση από το K_{cmid} όπως εξηγείται στο παράδειγμα για τα εσπεριδοειδή στον πίνακα 5.1. Για 50% φυλλοκάλυψη ή λιγότερο, το K_{cni} επίσης εκφράζει την εδαφοκάλυψη (γυμνό έδαφος, ή κάλυψη από ζιζάνια).

5.3.8 Το K_{cni} για αναποφλοιώτο ρύζι

Για την ανάπτυξη αναποφλοιώτου ρυζιού σε αγρό με βάθος νερού 0,1 - 0,2 m το ET_c κατά το αρχικό στάδιο κατά κανόνα καθορίζεται από την εξάτμιση του στάσιμου νερού. Το K_{cni} θα πρέπει να ρυθμίζεται για τοπικά κλίματα όπως δείχνει ο πίνακας 5.3 (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999)

Πίνακας 5.3: K_{cni} για το ρύζι για ποικίλες κλιματικές συνθήκες.

Υγρασία	Ταχύτητα ανέμου		
Κλίμα	Μικρή	Μεσαία	Μεγάλη
Ξηρό/ ημίξηρο	1.10	1.15	1.20
Υφυγρο/ υγρό	1.05	1.10	1.15
Πολύ υγρό	1.00	1.05	1.10

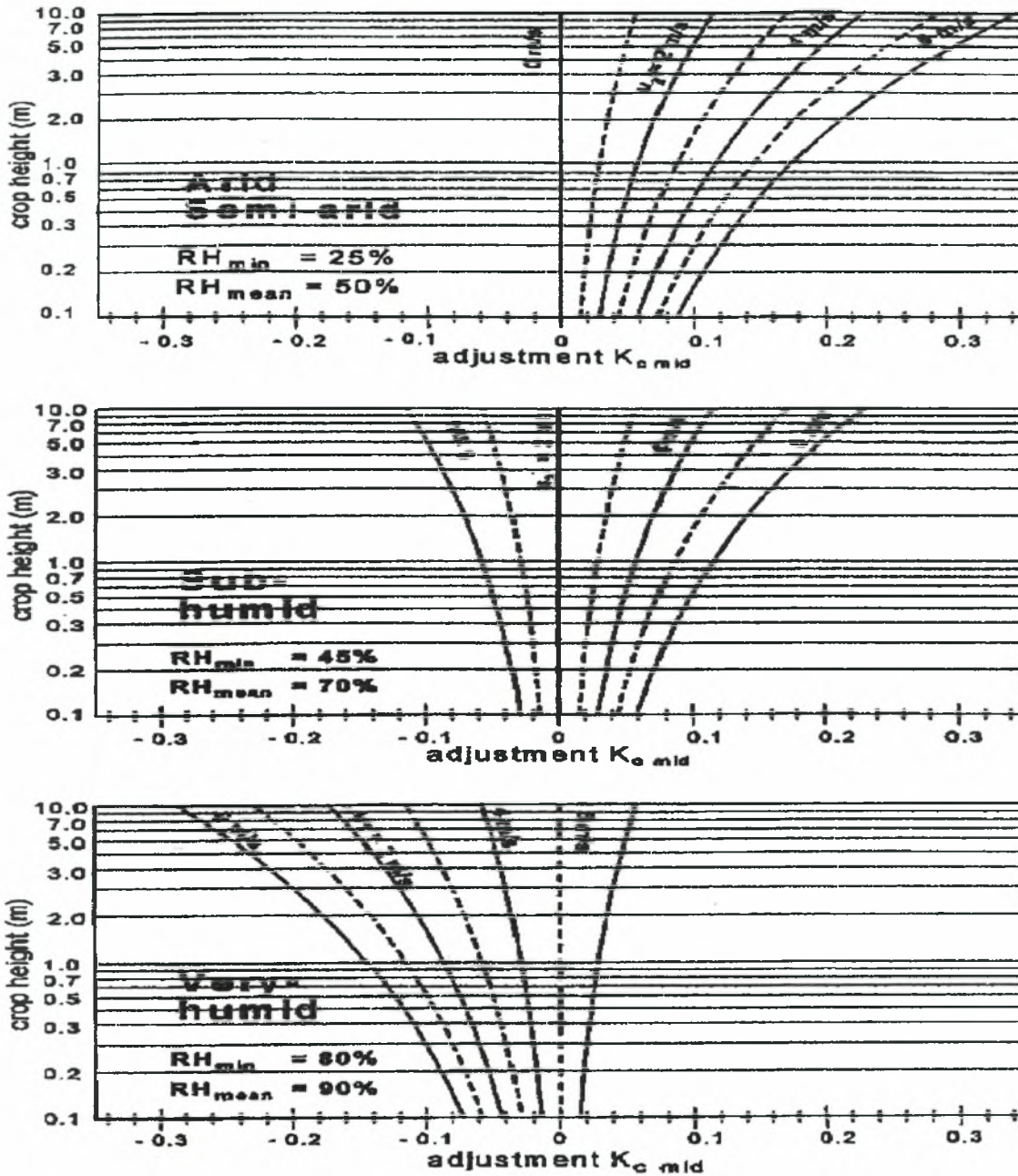
5.4 Φυτικός συντελεστής για το στάδιο της μέσης περιόδου (K_{cmd})

Παράδειγμα του κλιματικού αποτελέσματος

Οι τυπικές τιμές του φυτικού συντελεστή για το στάδιο ανάπτυξης της μέσης περιόδου, K_{cmd} υπάρχουν στον πίνακα 5.1 για ποικίλες αγροτικές καλλιέργειες.

Περισσότερο ξηρά κλίματα και μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου θα έχουν σαν αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές για το K_{cmd} . Πιο υγρά κλίματα και συνθήκες με χαμηλότερη ταχύτητα του ανέμου θα παρουσιάζουν μικρότερες τιμές για το K_{cmd} .

Η σχετική επίδραση του κλίματος στο K_{cmd} παρουσιάζεται στο σχήμα 5.7 όπου οι ρυθμίσεις στις τιμές από τον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται για διαφόρους τύπους κλιμάτων, για μέσες ημερήσιες ταχύτητες του ανέμου και για διαφορετικά φυτικά ύψη. (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999)



Σχήμα 5.7: Ρύθμιση (επιπρόσθετη) στις τιμές του K_c από τον πίνακα 5.1 για διάφορα ύψη φυτών (crop height) και μέσες ημερήσιες τιμές ταχύτητας του ανέμου.

5.5 Προσδιορισμός του $K_{c \text{ mid}}$

Για περιοχές όπου το RH_{\min} διαφέρει από 45% ή όπου το u_2 είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από 2.0 m/s, οι τιμές του $K_{c \text{ mid}}$ από τον πίνακα 5.1 ρυθμίζονται ως:

$$K_{c \text{ mid}} = K_{c \text{ mid(Tab)}} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (5.5)$$

Όπου: $K_{c\,mid}$: τιμή για το $K_{c\,mid}$ που λαμβάνεται από τον πίνακα 5.1,

u_2 : μέση τιμή για την ημερήσια ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από φυτική επιφάνεια κατά τη διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης μέσης περιόδου [$m\,s^{-1}$], για $1\,m\,s^{-1} < u_2 < 6\,m\,s^{-1}$,

RH_{min} : μέση τιμή για την ημερήσια ελάχιστη σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του σταδίου ανάπτυξης μέσης περιόδου [%], για $20\% < RH_{min} < 80\%$,

h : μέσο ύψος φυτών κατά τη διάρκεια του σταδίου μέσης περιόδου [m] για $0.1\,m < h < 10\,m$.

Πίνακας 5.4

Επίδραση του κλίματος στο $K_{c\,mid}$ για την καλλιέργεια σίτου σε συνθήκες αγρού.	
Από Πίνακα 5.1 Για σιτάρι: $K_{c\,mid} = 1.15$ και $h = 1.0\,m$	
Για ημιξηρικές προς ξηρικές συνθήκες:	
- για ισχυρό άνεμο (4 m/s)	$K_{c\,mid} = 1.15 + 0.10 = 1.25$
- για μέτριο άνεμο (2 m/s)	$K_{c\,mid} = 1.15 + 0.05 = 1.20$
- για ήπιο άνεμο (1 m/s)	$K_{c\,mid} = 1.15 + 0.00 = 1.17$
Για υπουγρές συνθήκες:	
- για ισχυρό άνεμο (4 m/s)	$K_{c\,mid} = 1.15 + 0.05 = 1.20$
- για μέτριο άνεμο (2 m/s)	$K_{c\,mid} = 1.15 + 0.00 = 1.15$
- για ήπιο άνεμο (1 m/s)	$K_{c\,mid} = 1.15 - 0.05 = 1.12$
Για συνθήκες με υψηλή υγρασία:	
- για ισχυρό άνεμο (4 m/s)	$K_{c\,mid} = 1.15 - 0.05 = 1.10$
- για μέτριο άνεμο (2 m/s)	$K_{c\,mid} = 1.15 - 0.10 = 1.05$
- για ήπιο άνεμο (1 m/s)	$K_{c\,mid} = 1.15 - 0.15 = 1.02$

Ανάλογα με την ξηρότητα του κλίματος και την επικράτηση των ανέμων, ο φυτικός συντελεστής για το σίτο κατά τη διάρκεια του σταδίου μέσης περιόδου κυμαίνεται από 1.02 (υγρός και ήπιος άνεμος) ως 1.25 (ξηρός και ισχυρός άνεμος).

$$RH_{min} = \frac{e^{\circ}(T_{min})}{e^{\circ}(T_{max})} 100$$

(5.6)

Οι τιμές για το u_2 και RH_{min} πρέπει να αντιπροσωπεύουν μόνο το στάδιο

ανάπτυξης μέσης περιόδου. Οι μετρήσεις, ο υπολογισμός, και η εκτίμηση του ελλείποντος στοιχείου αέρα και υγρασίας παρέχονται στην ταχύτητα του ανέμου του κεφαλαίου 3. Η ταχύτητα του ανέμου μετρημένη σε διαφορετικό από το ύψος 2 m πρέπει να ρυθμιστεί για να εκφράζει τις τιμές για την ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την καλλιέργεια αναφοράς.

Πίνακας 5.6. Εμπειρικές εκτιμήσεις της μηνιαίας ταχύτητας του ανέμου:

Περιγραφή	Μηνιαία ταχύτητα ανέμου στα 2 m
Ήπιος άνεμος	... < 1.0 m/s
Ήπιος προς μέτριος άνεμος	2.0 m/s
Μέτριος προς ισχυρός άνεμος	4.0 m/s
Ισχυρός άνεμος	... > 5.0 m/s
Γενικές συνθήκες	2 m/s

Πίνακας 5.7. Τυπικές τιμές για RH_{min} και RH_{mean} για τις γενικές κλιματολογικές συνθήκες

Κλιματολογική ταξινόμηση	RH_{min} (%)	RH_{mean} (%)
Ξηρό	20	45
Ημιάγονος	30	55
Υπο-υγρό	45	70
Υγρό	70	85
Πολύ υγρό	80	90

5.5.1 Ρύθμιση της συχνότητας άρδευσης

$K_{c\ mid}$ επηρεάζεται λιγότερο από τη συχνότητα άρδευσης από ότι το K_{cini} , δεδομένου ότι η καλλιέργεια κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου είναι γενικά κοντά στην πλήρη κάλυψη του εδάφους έτσι ώστε η επίδραση της επιφανειακής εξάτμισης στο K_c να είναι μικρότερη. Για τη συχνή άρδευση των καλλιεργειών (συχνότερα από κάθε 3 ημέρες) και όπου το K_{cmid} του πίνακα 5.1 είναι λιγότερο από 1.0, η τιμή μπορεί να αντικατασταθεί από περίπου 1.1-1.3

ώστε να θεωρηθεί συνδυασμένο αποτέλεσμα καλλιέργειας-εδάφους και η εξάτμιση οφείλεται στη μείωση της ανάπτυξης και στην τραχύτητα της βλάστησης, ειδικά εκεί όπου το σύστημα άρδευσης διαβρέχει ένα σημαντικό μέρος της εδαφικής επιφάνειας ($f_w > 0.3$).

5.6 ΦΥΤΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ

Τυπικές τιμές για τον φυτικό συντελεστή του τελικού σταδίου ανάπτυξης, $K_{c\text{end}}$, βρίσκονται στον πίνακα 5.1 για διάφορες καλλιέργειες. Εάν η καλλιέργεια αρδεύεται συχνά μέχρι τη συγκομιδή, η επιφάνεια του εδάφους παραμένει υγρή και η τιμή του $K_{c\text{end}}$ θα είναι σχετικά υψηλή. Από την άλλη πλευρά, οι καλλιέργειες που δεν αφήνονται να ωριμάσουν και να ξεραθούν στον αγρό πριν τη συγκομιδή αρδεύονται λιγότερο ή καθόλου κατά τη διάρκεια όλου του τελικού σταδίου ανάπτυξης. Συμπερασματικά, όταν τόσο η επιφάνεια του εδάφους όσο και η βλάστηση βρίσκονται σε ξηρή κατάσταση τόσο η τιμή του $K_{c\text{end}}$ θα είναι σχετικά μικρή.

Εκεί που η τοπική διαχείριση του νερού και η συγκομιδή είναι γνωστό ότι αποκλίνουν από τις τυπικές τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1, τότε ο χρήστης πρέπει να κάνει μερικές ρυθμίσεις στις τιμές του $K_{c\text{end}}$. Για πρόωρη συγκομιδή, ο χρήστης μπορεί να κατασκευάσει μια K_c καμπύλη χρησιμοποιώντας την τιμή του $K_{c\text{end}}$ που παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1.

Οι τιμές του $K_{c\text{end}}$ στον πίνακα 5.1 είναι τυπικές τιμές για τον μέσο $K_{c\text{end}}$ σε συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες. Περισσότερο ξηρά κλίματα και συνθήκες με μεγάλη ταχύτητα ανέμου θα έχουν υψηλότερες τιμές για το $K_{c\text{end}}$. Περισσότερο υγρά κλίματα και συνθήκες με χαμηλή ταχύτητα ανέμου θα έχουν χαμηλότερες τιμές για το $K_{c\text{end}}$. Για ειδικές ρυθμίσεις στα κλίματα όπου η RH_{\min} διαφέρει από 45% ή εκεί που η u_2 είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από 2.0 m/s, η εξίσωση 5.7 μπορεί να γίνει:

$$K_{c\text{end}} = K_{c\text{end}}(\text{Tab}) + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (5.7)$$

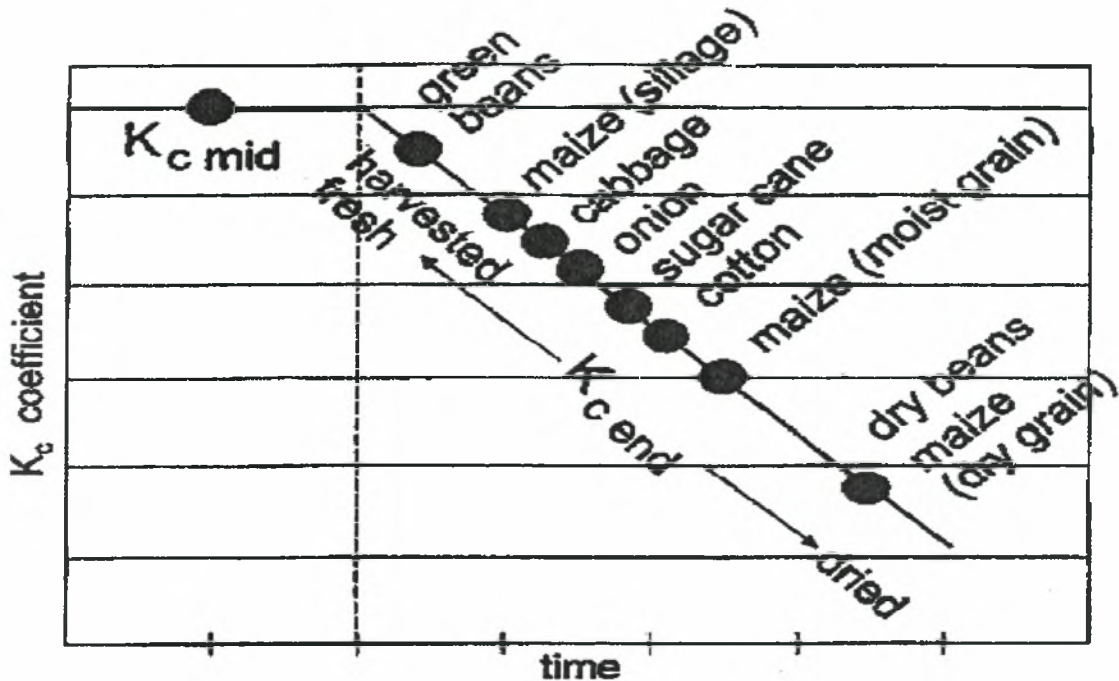
Όπου $K_{c\text{end}}$: τιμή για $K_{c\text{end}}$ από πίνακα 5.1,

u_2 : μέση τιμή για την ημερήσια ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2m πάνω από την καλλιέργεια αναφοράς κατά τη διάρκεια του τελικού σταδίου ανάπτυξης [m s^{-1}], για $1 \text{ m s}^{-1} < u_2 < 6 \text{ m s}^{-1}$,

RH_{min} : μέση τιμή για την ημερήσια ελάχιστη σχετική υγρασία κατά τη διάρκεια του τελικού σταδίου ανάπτυξης [%],

για $20\% < RH_{min} < 80\%$,

h : ύψος φυτών κατά τη διάρκεια του τελικού σταδίου ανάπτυξης [m],
για $0.1 \text{ m} < h < 10 \text{ m}$.



Σχήμα 5.8. Αναμενόμενες τιμές για το $K_{c\text{end}}$

5.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ K_c ΚΑΜΠΥΛΗΣ

5.7.1 Ετήσιες καλλιέργειες

Μόνο τρεις τιμές για το K_c χρειάζονται για να περιγραφεί και να κατασκευαστεί η K_c καμπύλη. Η καμπύλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.9 κατασκευάζεται ακολουθώντας τα τρία παρακάτω βήματα:

1. Διαιρείται η καλλιεργητική περίοδος σε τέσσερα γενικά στάδια ανάπτυξης τα οποία περιγράφουν την φαινολογία της καλλιέργειας ή την ανάπτυξη, καθορίζονται τα μήκη των σταδίων ανάπτυξης και προσδιορίζονται οι τρεις K_c τιμές που αντιστοιχούν στα $K_{c\text{ini}}$, $K_{c\text{mid}}$ και $K_{c\text{end}}$ από τον πίνακα 5.1.

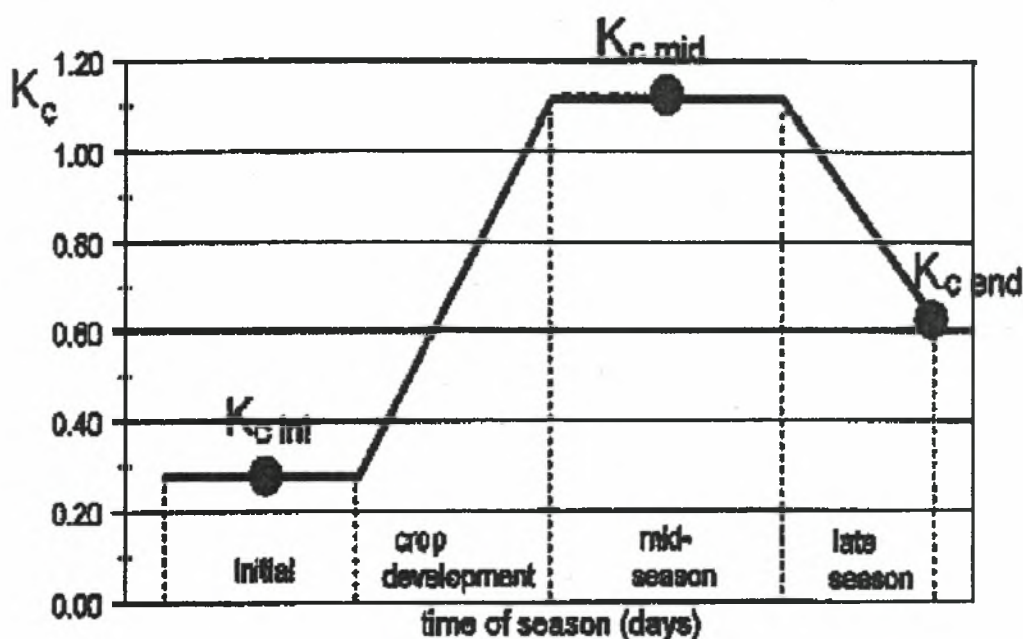
2. Προσαρμόζονται οι K_c τιμές στην συχνότητα άρδευσης και / ή στις κλιματικές συνθήκες των σταδίων ανάπτυξης.

3. Κατασκευάζεται μια καμπύλη συνδέοντας τμήματα ευθείας γραμμής για καθένα από τα τέσσερα στάδια ανάπτυξης. Οριζόντιες γραμμές

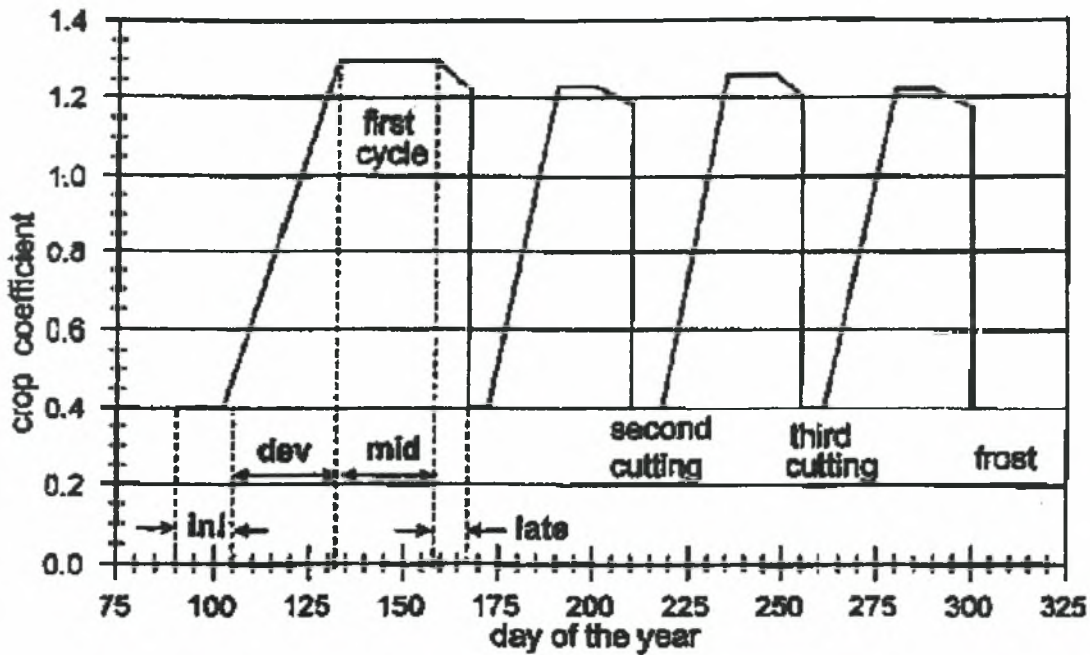
σχεδιάζονται για το $K_{c\text{ ini}}$ στο αρχικό στάδιο και για το $K_{c\text{ mid}}$ στο μεσαίο στάδιο. Διαγώνιες γραμμές σχεδιάζονται από το $K_{c\text{ ini}}$ προς το $K_{c\text{ mid}}$ χωρίς την πορεία του σταδίου ανάπτυξης της καλλιέργειας και από το $K_{c\text{ mid}}$ προς το $K_{c\text{ end}}$ χωρίς την πορεία του σταδίου της τελευταίας εποχής. (FAO-56, Estimation Of Crop Evapotranspiration, 1999)

5.7.2 K_c καμπύλες για καλλιέργειες ζωοτροφών

Πολλές καλλιέργειες που προορίζονται για ζωοτροφές ή για σανό συγκομίζονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές κατά την εποχή ανάπτυξης. Το σχήμα 5.10 παρουσιάζει μια K_c καμπύλη για ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο κατασκευασμένη για μηδική για σανό.



Σχήμα 5.9. Καμπύλη φυτικού συντελεστή



Σχήμα 5.10. Κατασκευασμένη K_c καμπύλη για καλλιέργεια μηδικής στο νότιο Idaho, χρησιμοποιώντας τιμές από τον πίνακα 5.1 (Wright, 1990)

5.7.3 Αριθμητικός προσδιορισμός του K_c

Ο συντελεστής K_c για κάθε στάδιο ανάπτυξης μπορεί να προέρχεται από την μελέτη κατά τη διάρκεια των αρχικών και μεσαίων σταδίων. Κατά την ανάπτυξη της καλλιέργειας και το στάδιο της τελευταίας περιόδου, το K_c ποικίλει ανάμεσα στο K_c του τέλους του προηγούμενου σταδίου ($K_{c\text{ prev}}$) και στο K_c της αρχής του επόμενου σταδίου ($K_{c\text{ next}}$), το οποίο είναι το $K_{c\text{ end}}$ στην περίπτωση του σταδίου της τελευταίας περιόδου:

$$K_{ci} = K_{c\text{ prev}} + \left[\frac{i - \sum (L_{\text{prev}})}{L_{\text{stage}}} \right] (K_{c\text{ next}} - K_{c\text{ prev}}) \quad (5.8)$$

Όπου: i : αριθμός ημέρας του έτους ,

K_{ci} : φυτικός συντελεστής την ημέρα i ,

L_{stage} : μήκος του σταδίου υπό εξέταση [μέρες],

$\sum (L_{\text{prev}})$: άθροισμα των μηκών όλων των προηγούμενων σταδίων [ημέρες].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

6.1. ΜΕΘΟΔΟΙ BLANEY-GRIDDLE

Η διαδικασία των Blaney-Griddle για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών αναπτύχθηκε κατ' αρχή στις δυτικές ΗΠΑ αλλά γρήγορα έτυχε παγκόσμιας αποδοχής στα χρόνια που ακολούθησαν. Η αρχική διαδικασία βασίστηκε σε μετρήσεις εξατμισοδιαπνοής που έγιναν τις δεκαετίες 1920 και 1930, με παρακολούθηση των μεταβολών της εδαφικής υγρασίας σε δείγματα εδάφους. Οι Blaney και Morin (1942) ανέπτυξαν μια πρώτη εμπειρική σχέση που βασίστηκε στη συσχέτιση της εξατμισοδιαπνοής με τη μέση θερμοκρασία του αέρα, το μέσο ποσοστό των ωρών ημέρας και τη μέση σχετική υγρασία. Η σχέση αυτή αργότερα τροποποιήθηκε από τους Blaney και Griddle (1950,1962) και Blaney et al., (1952) με απαλοιφή του όρου της σχετικής υγρασίας, οπότε πήρε την τελική της μορφή.

Στην αρχική της μορφή η σχέση αναφέρονταν στον υπολογισμό της εποχιακής εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών, με τη βασική παραδοχή ότι αυτή άμεσα διαμορφώνεται από το άθροισμα των γινομένων των μέσων μηνιαίων θερμοκρασιών και των μέσων μηνιαίων ποσοστών των ωρών ημέρας του έτους, για μια δυναμικά αναπτυσσόμενη καλλιέργεια υπό συνθήκες επαρκούς εδαφικής υγρασίας. Η σχέση αυτή είχε τη μορφή

$$U = K_F = K \Sigma f \quad (6.1)$$

όπου u είναι η εποχιακή εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας, την οποία οι Blaney και Griddle ονομάζουν "αναγκαία κατανάλωση", K είναι ένας εμπειρικός εποχιακός συντελεστής αναγκαίας κατανάλωσης και P είναι ένας εποχιακός παράγοντας αναγκαίας κατανάλωσης που είναι το άθροισμα των επί μέρους f . Οι μηνιαίοι παράγοντες αναγκαίας κατανάλωσης δίνονται από τη σχέση

$$f = (0,46T + 8,13)p \quad (6.2)$$

όπου T είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία της ατμόσφαιρας σε °C και p είναι το μέσο μηνιαίο ποσοστό των ωρών ημέρας του έτους. Τιμές του p για κάθε μήνα, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος ενός τόπου, δίνονται στον Πίνακα 1. Όσον αφορά τον εμπειρικό εποχιακό συντελεστή αναγκαίας κατανάλωσης, οι Blaney και Griddle τον υπολόγισαν για διάφορες καλλιέργειες που αναπτύσσονται στις δυτικές

ΗΠΑ. Για άλλες περιοχές συνιστούν οι συντελεστές αυτοί να προσδιορίζονται τοπικά. Τέτοιοι προσδιορισμοί έχουν γίνει σε αρκετά μέρη του κόσμου, από τους οποίους προέκυψαν οι τιμές που δίνονται στον Πίνακα 6.1. Η πλήρης σχέση των Blaney-Griddle έχει τη μορφή

$$U = \sum_{i=1}^n (0.46T_i + 8.13)p_i \quad (6.3)$$

όπου U είναι η εποχιακή αναγκαία κατανάλωση σε mm πάχους υδατίνου στρώματος, T_i είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία για κάθε μήνα της βλαστικής περιόδου σε $^{\circ}\text{C}$ και p_i είναι το μηνιαίο ποσοστό των ωρών ημέρας του έτους για κάθε μήνα της βλαστικής περιόδου.

Η σχέση των Blaney-Griddle επιχειρήθηκε να χρησιμοποιηθεί και για υπολογισμούς της μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής των καλλιεργειών με την εισαγωγή μηνιαίων συντελεστών αναγκαίας κατανάλωσης, οπότε παίρνει τη μορφή

$$u_i = k_i f_i = k_i (0.46T_i + 8.13)p_i \quad (6.4)$$

όπου u_i είναι η μηνιαία αναγκαία κατανάλωση σε mm και k_i είναι ο μηνιαίος συντελεστής αναγκαίας κατανάλωσης. Όπως είναι διαμορφωμένη η σχέση, οι k_i αντιπροσωπεύουν την επίδραση της καλλιέργειας και της ατμόσφαιρας στην εξατμισοδιαπνοή. Ο Pruitt (1960) παρουσίασε μια σχέση για τον υπολογισμό του k για τη μηδική που έχει τη μορφή

$$k_i = 0.04 + (0.0994T_i + 1.766)p_i \quad (6.5)$$

Οι σχέσεις (6.3) και (6.4) υπολογίζουν την εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και όχι την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς. Σήμερα, η κλασική μέθοδος Blaney-Griddle δεν χρησιμοποιείται λόγω των σημαντικών αποκλίσεων που παρουσιάζει από την πραγματικότητα. Επίσης, πρέπει να διευκρινιστεί ότι, οι συντελεστές αναγκαίας κατανάλωσης που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή δεν έχουν καμιά αντιστοιχία με τους φυτικούς συντελεστές που χρησιμοποιούνται με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και δεν πρέπει να συγχέονται με αυτούς.

Η Soil Conservation Service των ΗΠΑ (USDA, 1970) εισήγαγε μια συνθετική σχέση για τον υπολογισμό μηνιαίων τιμών του συντελεστή αναγκαίας κατανάλωσης που περιλαμβάνει έναν κλιματικό, k_i , και ένα φυτικό k_c , συντελεστή. Η σχέση αυτή

$$\text{έχει τη μορφή: } k = k_i k_c \quad (6.6)$$

όπου το k_i είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα και δίνεται από τη σχέση:

$$k_i = 0,03114T + 0,240 \quad (6.7)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία του αέρα σε °C. Τιμές του k_c δόθηκαν από την SCS για διάφορες καλλιέργειες με τη μορφή διαγραμμάτων. Αν χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα που αναφέρονται σε χορτοτάπητα και μηδική και γίνει η αντικατάσταση τους στη σχέση (6.6), το αποτέλεσμα που θα δώσει η εφαρμογή της σχέσης (6.4) αντιστοιχεί στην εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για χορτοτάπητα ή μηδική, αντίστοιχα. Η SCS προσέγγισε τα διαγράμματα που αναφέρονται σε χορτοτάπητα και μηδική με πολυωνυμικές σχέσεις που έχουν σαν ανεξάρτητη μεταβλητή έναν παράγοντα J_r , που δίνεται από τη σχέση:

$$J_r = \frac{\left[M + \frac{D}{30.5} - 1 \right]}{12} \quad (6.8)$$

όπου M είναι ο μήνας του έτους και D είναι η ημέρα του μήνα.

Η σχέση που δίνει το k_c για χορτοτάπητα έχει τη μορφή

$$k_c = 0.472 + 0.273J_r + 8.53J_r^2 - 24.4J_r^3 + 24.3J_r^4 - 8.8J_r^5 \quad (6.9)$$

και για μηδική

$$k_c = 0.606 + 0.0552J_r + 10.29J_r^2 - 26.7J_r^3 + 24.0J_r^4 - 7.6J_r^5 \quad (6.10)$$

Η μέθοδος των Blaney-Griddle, όπως αυτή διαμορφώνεται με την εισαγωγή των συντελεστών της SCS, αναφέρεται σαν μέθοδος Blaney-Griddle κατά SCS και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς από χορτοτάπητα ή μηδική, χρησιμοποιώντας αντίστοιχα τα k_c από τις σχέσεις (6.9) και (6.10).

Οι Doorenbos και Pruitt (1977) τροποποίησαν ριζικά την αρχική σχέση των Blaney-Griddle και της έδωσαν μια νέα μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς από χορτοτάπητα. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται σαν τροποποιημένη μέθοδος Blaney-Griddle κατά FAO-24 και βασίζεται στη γραμμική σχέση που παρατηρήθηκε μεταξύ μετρημένων τιμών της ET_r και του

παράγοντα f των Blaney-Griddle σε διάφορες πειραματικές θέσεις σε πολλά μέρη του κόσμου. Η σχέση αυτή έχει τη μορφή:

$$ET_r = a + bf \quad (6.11)$$

Όπου ET_r είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με βάση χορτοτάπητα,

$$f = (0.46T + 8.13)p \quad (6.12)$$

a είναι ένας συντελεστής που δίνεται από τη σχέση:

$$a = 0.0043RH_{\min} - nN^{-1} - 1.41 \quad (6.13)$$

και b είναι ένας συντελεστής που δίνεται από πίνακα σαν συνάρτηση της ελάχιστης σχετικής υγρασίας, της σχετικής ηλιοφάνειας και της ταχύτητας του ανέμου. Τιμές του συντελεστή b δίνονται στον Πίνακα 6.2. Το b μπορεί επίσης να υπολογιστεί με τη σχέση που έδωσαν οι Fevert et al. (1983), η οποία είναι βασισμένη στον πίνακα 6.2 και έχει τη μορφή:

$$b = a_0 + a_1(RH_{\min}) + a_2(nN^{-1}) + a_3(U_d) + a_4(RH_{\min})(nN^{-1}) + a_5(RH_{\min})(U_d) \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.81917 \\ a_1 &= -0.0040922 \\ a_2 &= 1.0705 \\ a_3 &= 0.065649 \\ a_4 &= -0.0059684 \\ a_5 &= -0.0005967 \end{aligned}$$

Όπου :

Μια άλλη σχέση για τον υπολογισμό του b δόθηκε αργότερα από τους Allen και Pruitt (1991). Στις παραπάνω σχέσεις (6.11) μέχρι (6.14) ET_r είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς με βάση χορτοτάπητα σε $mm d^{-1}$, T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας σε $^{\circ}C$, p είναι το ημερήσιο ποσοστό των ωρών της ημέρας του έτους που δίνεται στον πίνακα 6.3, RH_{\min} είναι η ελάχιστη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας σαν ποσοστό %, n/N είναι η σχετική ηλιοφάνεια (n είναι η πραγματική ηλιοφάνεια σε ώρες, N είναι η μέγιστη πιθανή ηλιοφάνεια σε ώρες που δίνεται στον πίνακα 6.4) και U_d είναι η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας σε ύψος 2m πάνω από το έδαφος σε ms^{-1} .

Έχει διαπιστωθεί ότι η ET_r που δίνεται από τη σχέση (6.16) επηρεάζεται αυστηρά από το υψόμετρο. Κατά τους Doorenbos και Pruitt (1977), για κάθε 1000

μέτρα αύξηση του υψομέτρου, η ET_r πρέπει να αυξάνεται κατά 10%. Οι Allen και Pruitt (1986) συμπεριέλαβαν την επίδραση του υψομέτρου και η σχέση υπολογισμού της ET_r που διαμόρφωσαν έχει τη μορφή :

$$ET_r = (a + bf)(1 + 0.0001EL) \quad (6.15)$$

Όπου EL είναι το υψόμετρο σε m.

Η τροποποιημένη μέθοδος Blaney-Griddle κατά FAO-24 εξακολουθεί να χρησιμοποιεί σαν κύρια παράμετρο τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και δεν περιλαμβάνει όρο αντιπροσωπευτικό της ηλιακής ακτινοβολίας. Για το λόγο αυτό η χρήση της για τον υπολογισμό της ET_r πρέπει να γίνεται με πολύ περίσκεψη, ιδιαίτερα όταν αναφέρεται σε παράκτιες περιοχές όπου η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας επηρεάζεται σημαντικά από τη θάλασσα, σε κλίματα όπου παρουσιάζεται έντονη διακύμανση της ηλιοφάνειας κατά τις μεταβατικές εποχές (άνοιξη και φθινόπωρο) και σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο όπου η μέση ημερήσια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας πιέζεται προς τα κάτω λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών που επικρατούν κατά τη νύχτα. Το τελευταίο αυτό βελτιώνεται με την εισαγωγή του παράγοντα του υψομέτρου στη σχέση (6.15).

Για τον υπολογισμό του b χρησιμοποιείται η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας, U_d , (ώρες από 07:00 μέχρι 19:00). Η ταχύτητα αυτή μπορεί να βρεθεί αν υπάρχουν ωριαίες παρατηρήσεις. Αν οι διαθέσιμες παρατηρήσεις είναι μέσες τιμές 24ώρου, ένας προσεγγιστικός τρόπος υπολογισμού της U_d είναι με τη σχέση:

$$U_d = \frac{2U \left(\frac{U_d}{U_n} \right)}{1 + \left(\frac{U_d}{U_n} \right)} \quad \text{όπου } U_n \text{ η ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια των ωρών της}$$

νύχτας σε ύψος 2m πάνω από το έδαφος ή την απλοποιημένη μορφή $U_d = \frac{4}{3}U$ όπου U η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια του 24ώρου.

Μια άλλη προϋπόθεση είναι ότι η ταχύτητα του ανέμου πρέπει να είναι μετρημένη σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό ισχύει και για όλες τις άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν σαν παράμετρο την ταχύτητα του ανέμου. Αν οι διαθέσιμες παρατηρήσεις έχουν γίνει σε διαφορετικό ύψος, η ταχύτητα του ανέμου

μπορεί να αναχθεί σε ύψος 2m με τις σχέσεις $U_2 = U_z \cdot \frac{\ln\left(\frac{z_2 - d}{z_{om}}\right)}{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right)}$

$U_2 = U_z \left[\frac{4.87}{\ln(67.8z_m - 5.42)} \right]$ και $U_2 = U_z \left(\frac{2}{z} \right)^{0.2}$

Πίνακας 6.1. Μηνιαία ποσοστά ωρών ημέρας έτους, ρ, για βόρεια πλάτη από 32° μέχρι 42°.

	Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος					
Μήνας	32°	34°	36°	38°	40°	42°
Ιανουάριος	7,20	7,10	6,69	6,87	6,73	6,60
Φεβρουάριος	6,97	6,91	6,86	6,79	6,73	6,66
Μάρτιος	8,37	8,36	8,35	8,34	8,30	8,28
Απρίλιος	8,72	8,80	8,85	8,90	8,92	8,97
Μάιος	9,33	9,72	9,98	9,92	9,99	10,10
Ιούνιος	9,60	9,70	9,83	9,95	10,08	10,21
Ιούλιος	9,77	9,88	9,99	10,10	10,34	10,37
Αύγουστος	9,28	9,33	9,40	9,47	9,56	9,64
Σεπτέμβριος	8,34	8,36	8,36	8,38	8,41	8,42
Οκτώβριος	7,93	7,90	7,85	7,80	7,78	7,73
Νοέμβριος	7,11	7,02	6,92	6,82	6,73	6,63
Δεκέμβριος	7,05	6,92	6,79	6,66	6,53	6,39

Πίνακας 6.2. Τιμές του συντελεστή b που χρησιμοποιούνται στην τροποποιημένη μέθοδο B-G FAO24

n/N	RH _{mn} %						Ταχύτητα ανέμου ημέρας m/s
0,0	0,84	0,80	0,74	0,64	0,52	0,38	
0,2	1,03	0,95	0,87	0,76	0,63	0,48	
0,4	1,22	1,10	1,01	0,88	0,74	0,57	U _d =0
0,6	1,38	1,24	1,13	0,99	0,85	0,66	
0,8	1,54	1,37	1,25	1,09	0,94	0,75	
1,0	1,68	1,50	1,36	1,18	1,04	0,84	
0,0	0,97	0,90	0,81	0,68	0,54	0,40	
0,2	1,09	1,08	0,96	0,84	0,66	0,50	

0,4	1,41	1,26	1,11	0,97	0,77	0,60	U _a =2
0,6	1,60	1,42	1,25	1,09	0,89	0,70	
0,8	1,79	1,59	1,39	1,21	1,01	0,79	
1,0	1,98	1,74	1,52	1,31	1,11	0,89	
0,0	1,08	0,98	0,87	0,72	0,56	0,42	
0,2	1,33	1,18	1,03	0,87	0,69	0,52	
0,4	1,56	1,38	1,19	1,02	0,82	0,62	U _a =4
0,6	1,78	1,56	1,34	1,15	0,94	0,73	
0,8	2,00	1,74	1,50	1,28	1,05	0,83	
1,0	2,19	1,90	1,64	1,39	1,16	0,92	
0,0	1,18	1,06	0,92	0,74	0,58	0,43	
0,2	1,44	1,27	1,10	0,91	0,72	0,54	
0,4	1,70	1,48	1,27	1,06	0,85	0,64	
0,6	1,94	1,67	1,44	1,21	0,97	0,75	U _a =6
0,8	2,18	1,86	1,59	1,34	1,09	0,85	
1,0	2,39	2,03	1,74	1,46	1,20	0,95	
0,0	1,26	1,11	0,96	0,76	0,60	0,44	
0,2	1,52	1,34	1,14	0,93	0,74	0,55	
0,4	1,79	1,56	1,32	1,10	0,87	0,66	
0,6	2,05	1,76	1,49	1,25	1,00	0,77	U _a =8
0,8	2,30	1,96	1,66	1,39	1,12	0,87	
1,0	2,54	2,14	1,82	1,52	1,24	0,98	
0,0	1,29	1,15	0,98	0,78	0,61	0,45	
0,2	1,58	1,38	1,17	0,96	0,75	0,56	
0,4	1,86	1,61	1,36	1,13	0,89	0,68	U _a =10 U _a =6
0,6	2,13	1,83	1,54	1,28	1,03	0,79	
0,8	2,39	2,03	1,71	1,43	1,15	0,89	
1,0	2,63	2,22	1,86	1,56	1,27	1,00	

6.2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΑΚΚΙΝΚ

Ο Makink (1957) παρουσίασε μια μέθοδο υπολογισμού της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής που εκφράζεται από τη σχέση:

$$ET_p = a + b \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s \quad (6.16)$$

όπου ET_p είναι η δυναμική εξατμισοδιαπνοή σε mm/d, Δ είναι η κλίση της γραμμής (ευθείας) στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών-θερμοκρασίας σε $kPa^{\circ}C^{-1}$, γ είναι η ψυχομετρική σταθερά σε $kPa^{\circ}C^{-1}$, R_s είναι η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης εκφρασμένη σαν ισοδύναμο πάχος εξατμιζόμενου νερού σε mm/d, a είναι ένας συντελεστής που έχει διαστάσεις mm/d, b είναι ένας διορθωτικός παράγοντας που εξαρτάται από τη μέση σχετική υγρασία, RH_{mean} , και την ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας, U_d . Ο Makink, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τις Κάτω Χώρες, βρήκε ότι $a = -0,12$ και $b = 0,61$.

Οι Doorenbos και Pruitt (1977) χρησιμοποίησαν αυτούσια τη σχέση (6.16) για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς για χορτοτάπητα, χρησιμοποιώντας παρατηρήσεις από πολλές περιοχές του κόσμου και βρήκαν ότι $a = -0,3$ mm/d και το b βρίσκεται από έναν πίνακα σαν συνάρτηση των RH_{mean} και U_d . Με τη μορφή αυτή η μέθοδος αναφέρεται σαν **μέθοδος Makink κατά FAO-24**. Αργότερα, οι Fevert et al. (1983) υπολόγισαν το b με μια πολυωνυμική εξίσωση που βασίζεται στον πίνακα των Doorenbos και Pruitt, η οποία έχει τη μορφή:

$$b = a_0 + a_1(RH_{mean}) + a_2(U_d) + a_3(RH_{mean})(U_d) + a_4(RH_{mean}^2) + a_5(U_d^2) \quad (6.17)$$

όπου και $a_0 = 1.0656$, $a_1 = -0.128 \times 10^{-2}$, $a_2 = 0.045$, $a_3 = -0.20033 \times 10^{-3}$, $a_4 = -0.31508 \times 10^{-4}$ και $a_5 = -0.11026 \times 10^{-2}$. Τα όρια ισχύος της σχέσης (2.2) είναι $0 \leq RH_{mean} \leq 100\%$ και $0 \leq U_d \leq 10 m s^{-1}$.

Στη σχέση (6.16), η ηλιακή ακτινοβολία, R_s , είτε μετράται είτε υπολογίζεται προσεγγιστικά.

6.3 ΜΕΘΟΔΟΙ PENMAN

Ο Penman (1948) παρουσίασε την πρώτη συνδυασμένη μέθοδο για τον υπολογισμό της εξάτμισης, που κατά το ένα μέρος της αποτελείται από

παράγοντες που προσδιορίζουν την ενέργεια που απαιτείται για εξάτμιση και κατά το άλλο μέρος από παράγοντες που διαμορφώνουν το μηχανισμό απομάκρυνσης των υδρατμών. Η εξίσωση Penman για εξάτμιση από μια ελεύθερη επιφάνεια νερού, E_0 , έχει τη μορφή

$$\lambda E_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \lambda E_a \quad (6.18)$$

$$\text{Όπου } E_a = (e_z^0 - e_z) f(u) \quad (6.19)$$

όπου $f(u)$ είναι μια συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου.

Αργότερα, ο Penman (1963) επεξεκίνησε τη σχέση (6.18) και για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής από χορτοτάπητες. Η νέα σχέση, η οποία δίνει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς όταν σαν καλλιέργεια αναφοράς χρησιμοποιείται χορτοτάπητας, έχει τη μορφή:

$$\lambda ET_r = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 15,36(1,0 + 0,0062u_2)(e_z^0 - e_z) \quad (6.20)$$

όπου $\lambda ET_r, R_n$ και G είναι σε $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$, u_2 είναι η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από το έδαφος σε m s^{-1} , και e_z^0 και e_z (πίεση κορεσμού και πραγματική πίεση υδρατμών αντίστοιχα) είναι σε mb .

Αν $\lambda ET_r, R_n$ και G είναι σε $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, u_2 είναι σε m s^{-1} και e_z^0, e_z είναι σε kPa , η σχέση (6.20) παίρνει τη μορφή:

$$\lambda ET_r = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 6,43 W_f (e_z^0 - e_z) \quad (6.21)$$

$$\text{όπου } W_f = (1,0 + 0,53u_2)$$

Οι Doorenbos και Pruitt (1977) παρουσίασαν μια τροποποιημένη μορφή της σχέσης (6.21), που αναφέρεται σαν **τροποποιημένη μέθοδος Penman** κατά FAO-24. Οι κυρίες τροποποιήσεις συνίστανται στην εισαγωγή μιας πιο ευαίσθητης συνάρτησης ανέμου και ενός παράγοντα προσαρμογής, c , που βασίζεται στις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Η σχέση που δίνει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς για χορτοτάπητα έχει τη μορφή:

$$ET_r = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} 2.7 W_f (e_z^0 - e_z) \right] \quad (6.22)$$

$$\text{Όπου } W_f = (1 + 0.864 u_2) \quad (6.23)$$

Στις σχέσεις αυτές, ET_r και R_n είναι σε $mm d^{-1}$, e_z^0 και e_z είναι σε kPa. Οι τιμές το c , σε συνάρτηση με τη μέγιστη σχετική υγρασία, RH_{max} την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, R_s σε $mm d^{-1}$, την ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας, U_d , και το λόγο U_d/U_n , δίνονται στον πίνακα 6, που είναι αναπαραγωγή αυτού που δίνουν οι Doorenbos και Pruitt (1977). Στα στοιχεία του πίνακα 6.6, οι Fevert et al. (1983) προσάρμοσαν μια πολυωνυμική εξίσωση για τον κατά προσέγγιση υπολογισμό του c , της οποίας η μορφή είναι:

$$c = a_0 + a_1(RH_{max}) + a_2(R_s) + a_3(U_d) + a_4\left(\frac{U_d}{U_n}\right) + a_5(U_d)\left(\frac{U_d}{U_n}\right) + a_6(RH_{max})(R_s)(U_d) + a_7(RH_{max})(R_s)\left(\frac{U_d}{U_n}\right) \quad (6.24)$$

όπου $a_0 = 0.6817$, $a_1 = 0.27864 \times 10^{-2}$, $a_2 = 0.018177$, $a_3 = -0.06825$, $a_4 = 0.012651$, $a_5 = 0.97297 \times 10^{-2}$, $a_6 = 0.43025 \times 10^{-4}$, και $a_7 = -0.92118 \times 10^{-7}$. Η εξίσωση (3.7) ισχύει μέσα στα όρια

$$0.5 \leq \frac{U_d}{U_n} \leq 4.0, 3.0 \leq R_s \leq 9 mm d^{-1}, 30 \leq RH_{max} \leq 90\% \text{ και } U_d \leq 9 m s^{-1}$$

Αργότερα, οι Allen και Pruitt (1991) παρουσίασαν δική τους σχέση με δέκα όρους για τον υπολογισμό του c .

Η τροποποιημένη μέθοδος Penman και FAO-24, επειδή περιλαμβάνει όρους ενέργειας και μεταφοράς υδρατμών, θεωρήθηκε αντιπροσωπευτική της ET_r από χορτοτάπητα και χρησιμοποιήθηκε εκτεταμένα από το τέλος της δεκαετίας του 1970 και μετά. Στην πορεία εφαρμογής της διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος υπερεκτιμούσε σημαντικά την ET_r . Οι Pruitt και Swann (1986) σε συγκρίσεις που έκαναν με παρατηρήσεις λυσιμέτρου στο Davis της Καλιφόρνιας, βρήκαν ότι η υπερεκτίμηση που διαπιστώθηκε για μια περίοδο 5 ετών ήταν πατά μέσο όρο 34%. Ο Weiss (1982) βρήκε ότι η μέθοδος υπερεκτίμησε κατά 9% την ET μηδικής σε σχέση με μετρήσεις

λυσιμέτρου. Η τάση για υπερεκτίμηση της ET_r διαπιστώθηκε και από τους Allen et al. (1989) και Jensen et al. (1990). Έτσι, για το Davis της Καλιφόρνιας βρέθηκε ότι η υπερεκτίμηση ήταν της τάξης 30-35% τόσο κατά τους μήνες αιχμής όσο και για το σύνολο της βλαστικής περιόδου. Σε πέντε θέσεις στις Η.Π.Α. και μια στην Αυστραλία, που χαρακτηρίζονται από ξηρά και ημίξηρα κλίματα, η υπερεκτίμηση ήταν κατά μέσο όρο 8% κατά τους μήνες αιχμής και 12% για όλη τη βλαστική περίοδο. Σε πέντε άλλες θέσεις, που χαρακτηρίζονται σαν υγρές ή σχεδόν υγρές, η υπερεκτίμηση ήταν 35% τόσο κατά τους μήνες αιχμής όσο και για το σύνολο της βλαστικής περιόδου. Οι Castrogano et al. (1985) βρήκαν ότι η μέθοδος υπερεκτίμησε την ET από χορτοτάπητα κατά 18% για όλο το έτος και κατά 14% για την περίοδο Απριλίου-Σεπτεμβρίου στη Νότια Ιταλία, σε σχέση με παρατηρήσεις λυσιμέτρου. Ο Tarantino (1991) διαπίστωσε υπερεκτίμηση της ET_r κατά 13-45% από χορτοτάπητα σε σχέση με παρατηρήσεις λυσιμέτρου στην Κεντρική Ιταλία. Ο Παπαζαφειρίου (1990,1996) διαπίστωσε υπερεκτιμήσεις κατά 25-42% σε διάφορες περιοχές της Ελλάδος ενώ, κατά μέσο όρο για όλη την Ελλάδα, τόσο κατά τους μήνες αιχμής όσο και για το σύνολο της βλαστικής περιόδου, η υπερεκτίμηση ήταν της τάξης του 30%.

Οι παραπάνω αναφορές δείχνουν καθαρά ότι η τροποποιημένη μέθοδος Penman κατά FAO-24 υπερεκτιμά κατά διάφορα ποσοστά την και, κατά συνέπεια, θα πρέπει να αναζητηθεί κάποια διαφορετική προσέγγιση της συνδυασμένης εξίσωσης για τον υπολογισμό της ET_r .

Πίνακας 6.3. Ημερήσια ποσοστά ωρών ημέρας έτους ρ για βόρεια πλάτη από 32° 0 μέχρι 42°.

	Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος					
Μήνας	32°	34°	36°	38°	40°	42°
Ιανουάριος	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21
Φεβρουάριος	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24
Μάρτιος	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Απρίλιος	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30
Μάιος	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33
Ιούνιος	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34
Ιούλιος	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33
Αύγουστος	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31
Σεπτέμβριος	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Οκτώβριος	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Νοέμβριος	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22
Δεκέμβριος	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21

Πίνακας 6.4. Η μέση ημερήσια θεωρητική ηλιοφάνεια, N για κάθε μήνα και βόρεια γεωγραφικά πλάτη από 32° 0 μέχρι 42°.

	Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος					
Μήνας	32°	34°	36°	38°	40°	42°
Ιανουάριος	10,3	10,2	10,0	9,8	9,6	9,4
Φεβρουάριος	11,3	11,0	10,9	10,8	10,7	10,6
Μάρτιος	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
Απρίλιος	13,0	13,1	13,1	13,2	13,3	13,4
Μάιος	13,8	13,9	14,1	14,3	14,4	14,6
Ιούνιος	14,2	14,4	14,6	14,8	15,0	15,2
Ιούλιος	14,1	14,2	14,4	14,6	14,7	14,9
Αύγουστος	13,3	13,4	13,5	13,6	13,7	13,9
Σεπτέμβριος	12,4	12,4	12,4	12,5	12,5	12,6
Οκτώβριος	11,4	11,3	11,3	11,2	11,2	11,1
Νοέμβριος	10,5	10,4	10,2	10,1	10,0	9,8
Δεκέμβριος	10	9,9	9,7	9,5	9,3	9,1

6.4 Μέθοδος Hargreaves.

Όταν τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας, σχετικής υγρασίας και/ή ταχύτητας του ανέμου λείπουν τότε η ET_o μπορεί να υπολογιστεί από μια ενναλακτική εξίσωση την Hargreaves που έχει ως εξής:

$$ET_o = 0.0023(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a \quad (6.27)$$

Όπου όλοι οι παράγοντες έχουν προσδιορισθεί προηγουμένως. Μονάδες μέτρησης της ET_o και R_a στην παραπάνω εξίσωση είναι mm/day και για στην κάθε περιοχή πρέπει να συγκρίνεται με την εκτίμηση της μεθόδου FAO Penman-Monteith σε μετεωρολογικούς σταθμούς όπου η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου και η σχετική υγρασία έχουν μετρηθεί. Η εξίσωση υποεκτιμά την εξατμισοδιαπνοή σε συνθήκες υψηλής ταχύτητας του ανέμου ($U_2 > 3$ m/s) και την υπερεκτιμά σε συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας.

6.5 Μέθοδος των Priestley-Taylor.

Πάνω από υγρές επιφάνειες, συνθήκες ισορροπίας συμβαίνουν πολύ σπάνια λόγω του ότι το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα δεν είναι ποτέ ομογενές. Αντίθετα συνέχεια βρίσκεται υπό την επίδραση συστημάτων μεγάλης κλίμακας που δημιουργούν συμπύκνωση και μη σταθερές τρισδιάστατες κινήσεις, που τείνουν να διατηρήσουν μια διαφορά στην τάση των υδρατμών μεταξύ της πραγματικής και της τάσης κορεσμού ακόμη και πάνω από τους ωκεανούς. Έτσι πάντοτε υπάρχει μια μορφή μεταφοράς ενέργειας, κάποιου βαθμού. Παρ' όλα αυτά όμως οι Priestley και Taylor (1972) θεώρησαν την εξατμισοδιαπνοή ισορροπίας σαν βάση για μια εμπειρική σχέση, που δίνει την εξατμισοδιαπνοή από μια υγρή επιφάνεια, υπό συνθήκες ελάχιστης μεταφοράς ενέργειας. Ανέλυσαν δεδομένα που συλλέχθηκαν πάνω από ωκεανούς και κορεσμένες επιφάνειες ξηράς και συσχέτισαν την δυνητική εξατμισοδιαπνοή ET_p με την εξατμισοδιαπνοή ισορροπίας ET_{eq} με μια εμπειρική σταθερά α με τη μορφή:

$$ET_p = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (6.28)$$

Για εκτεταμένες επιφάνειες ξηράς και επιφάνειες νερού χωρίς μεταφορά ενέργειας, οι Priestley και Taylor βρήκαν ότι η καλύτερη τιμή είναι $\alpha=1.26$.

Η μέθοδος των Priestley-Taylor είναι περισσότερο αξιόπιστη στις υγρές περιοχές.

Δεν έχει επαρκώς δοκιμαστεί στις ξηρές περιοχές. Επειδή το μοντέλο χρησιμοποιεί μετεωρολογικά δεδομένα, που είναι εύκολα προσιτά, χρησιμοποιείται αρκετά για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Η χρήση πρέπει να περιορίζεται σε χαμηλή φυτοκάλυψη μόνο, αλλιώς απαιτούνται τροποποιήσεις (Shuttleworth και Galder, 1979).

6.6 Μέθοδος Jensen-Haise.

Οι Jensen και Haise (1963) με βάση δεδομένα των ξηρών περιοχών των δυτικών Η.Π.Α. ανέπτυξαν την ακόλουθη εξίσωση:

$$ET_p = R_s(0.025T_a + 0.08) \quad (6.29)$$

Όπου T_a είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}C$, R_s είναι η ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία σε μονάδες ισοδύναμες με mm νερού και η ET_p είναι σε mm/day. Το μοντέλο κάνει σοβαρή υποεκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής υπό συνθήκες μεταφοράς ενέργειας. Οι Jensen et al. (1970) πρότειναν μια τροποποίηση της εξίσωσης (6.29) αλλά αυτή η τροποποιημένη μέθοδος υποεκτιμούσε την ET υπό συνθήκες μεταφοράς ενέργειας ακόμη πιο σοβαρά.

6.7 Προγραμματισμός άρδευσης με εξατμισόμετρο.

Ο προγραμματισμός άρδευσης με τη χρήση της μεθόδου του ισοζυγίου του νερού στο σύστημα διαχείρισης της άρδευσης πρέπει να έχει τη δυνατότητα να μετρά ή να εκτιμά το ρυθμό με τον οποίο το νερό χρησιμοποιήθηκε από την καλλιέργεια. Το εξατμισόμετρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείκτης ρυθμού της χρήσης του νερού από την καλλιέργεια. Το εξατμισόμετρο είναι ένα ανοιχτό δοχείο με νερό το οποίο είναι εκτεθειμένο στις ίδιες κλιματικές συνθήκες όπως η ανάπτυξη της καλλιέργειας κι από το οποίο το νερό εξατμίζεται κάτω από συγκεκριμένες κλιματικές συνθήκες.

Ο κλιματικός παράγοντας είναι μεγάλης σπουδαιότητας αιτία εξάτμισης του νερού. Όταν το εδαφικό νερό είναι ευκόλως διαθέσιμο στην καλλιέργεια, ο ρυθμός εξάτμισης του νερού από το εξατμισόμετρο Όπως αποδείχτηκε από πολλούς ερευνητές και τους προγραμματιστές άρδευσης, ότι δρα ανάλογα με το ρυθμό χρήσης του νερού από την καλλιέργεια (James 1988, Jensen 1980, Pair et al., 1983)

Τα ζωντανά φυτά είναι ένας σύνθετος οργανισμός σε σχέση με την χρήση

του νερού. Αυτοί κάνουν τους δικούς τους μηχανισμούς για τον οριακό ρυθμό διαπνοής και την περίοδο στρες από το νερό. Το εξατμισόμετρο δε μπορεί να έχει τέτοιους μηχανισμούς οπωσδήποτε, αυτοί δεν είναι σοβαροί περιορισμοί για τον προγραμματισμό της άρδευσης διότι οι αρδεύσεις είναι κανονικά προγραμματισμένες να διατηρούν ευνοϊκή περιεκτικότητα υγρασίας και να αποφεύγεται το στρες νερού από την καλλιέργεια. Η ΕΤ διαφέρει για τις διάφορες ποικιλίες των καλλιεργειών. Αυτό είναι ότι μερικές καλλιέργειες χρησιμοποιούνται με μεγάλο ρυθμό πρόσληψης νερού από άλλα όταν είναι εκτεθειμένες σε παρόμοιες κλιματολογικές συνθήκες και συνθήκες εδαφικού νερού. Αυτό γίνεται διότι οι διαφορές στην αντίσταση της μεταφοράς του νερού από διαφορετικά εδάφη και δια μέσου διαφορετικών τύπων από φυτά φυτών, και ο αριθμός των στομάτων στα φύλλα είναι μεταξύ των παραγόντων οι οποίοι επιδρούν στην αντίσταση μεταφοράς του νερού και τον ρυθμό ΕΤ.

Από το ρυθμό της εξάτμισης από ένα εξατμισόμετρο πρωταρχικά εξαρτάται πάνω σε κλιματικούς παράγοντες, ένα εξατμισόμετρο δεν μπορεί όλες να προσλείψει την διαφορά στην χρήση του νερού που οφείλονται στις διάφορες ποικιλίες της καλλιέργειας ή τις καλλιεργητικές πρακτικές. Αυτό απαιτεί ότι το εξατμισόμετρο πρέπει να βαθμολογείται για τις ειδικές συνθήκες της καλλιέργειας η οποία αρδεύεται.

Εκτός από τους κλιματολογικούς παράγοντες, ο ρυθμός της εξάτμισης από το εξατμισόμετρο εξαρτάται και από τον τύπο του εξατμισιμέτρου που χρησιμοποιείται, από την ποσότητα του νερού και από τη θέση του εξατμισιμέτρου. Οι φυσικές ιδιότητες των περιοχών που περιβάλλουν το εξατμισόμετρο μπορεί να επιδράσουν στο μικροκλίμα της περιοχής και κατά συνέπεια να επηρεάσουν το ρυθμό εξάτμισης από το εξατμισόμετρο. Οπωσδήποτε το εξατμισόμετρο πρέπει να κατασκευασθεί σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές που υπάρχουν ώστε να δίνει ακριβείς μετρήσεις.

Προδιαγραφές εξατμισιμέτρου. (National Weather Service (NWS))

$D=47.5 \text{ in} \sim 120 \text{ cm}$

$h=10.0 \text{ in} \sim 25 \text{ cm}$

Κατάσταση του εξατμισιμέτρου

Το εξατμισόμετρο πρέπει να είναι ελεύθερο από άλγη ή άλλα οργανικά, διότι

μειώνεται ο ρυθμός εξατμίσης. Μικρές συγκεντρώσεις από 5-10 ppm θειικού ψευδαργύρου Zn_2SO_4 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποτρέπουν την ανάπτυξη των οργανικών.

Σκουριασμένα μέρη του εξατμισιμέτρου όταν υπάρχουν πρέπει να επιδιορθώνονται βάφοντας αυτά με το ίδιο χρώμα του εξατμισιμέτρου. Σκοτεινά χρώματα δημιουργούν γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση του ρυθμού εξατμίσης. Λάδια ή γράσο ή οποιοσδήποτε άλλος τύπος αυτών δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται στο εξατμισίμετρο διότι αυτά τα προϊόντα έχουν την τάση να επιπλέουν και αποτρέπουν την εξατμίση. Το εξατμισίμετρο πρέπει να φυλάσσεται με αυλόγυρο για να αποτρέπει τα ζώα να πίνουν το νερό. Επίσης και τα πουλιά πρέπει να αποθαρρύνονται να πίνουν το νερό με κάλυμμα της επιφάνειάς του. Η ποσότητα του νερού στο εξατμισίμετρο μπορεί να επιδράσει κάπως γρήγορα αυξάνοντας ή μειώνοντας τη θερμοκρασία. Έτσι, το επίπεδο του νερού στο εξατμισίμετρο πρέπει πάντοτε να διατηρείται μεταξύ των 2 και 3 in από την ακμή (ανώτατο σημείο) του εξατμισιμέτρου. Αυτό εξασφαλίζει 7 έως 8 in βάθος νερού στις προδιαγραφόμενες 10 in βάθος του εξατμισιμέτρου.

6.8 Αντιστοίχιση των άλλων μεθόδων προς τη συνδυασμένη μέθοδο Penman-Monteith.

Σε πάρα πολλές περιοχές υπάρχουν διαθέσιμες μόνο παρατηρήσεις θερμοκρασίας του αέρα και βροχόπτωσης. Για τις περιοχές αυτές μπορεί να χρησιμοποιηθούν μόνο μέθοδοι που χρησιμοποιούν τη θερμοκρασία για τον υπολογισμό της ET_r , όπως είναι κάποιες από τις μεθόδους Blaney-Griddle. Επειδή οι απλοποιημένες, αυτές μέθοδοι στερούνται των κύριων μετεωρολογικών παραμέτρων που επηρεάζουν την τιμή της ET_r , είναι απαραίτητο να γίνει κάποια προσαρμογή τους σε τοπικό ή ευρύτερο επίπεδο, ώστε να προσεγγίζουν την πραγματική τιμή της ET_r . Η προσαρμογή αυτή μπορεί να γίνει με συσχέτιση προς την ET_r που προκύπτει από τη μέθοδο Penman-Monteith. Η συσχέτιση πρέπει να γίνεται στους πλησιέστερους τόπους όπου υπάρχουν αξιόπιστα στοιχεία για την εφαρμογή της μεθόδου Penman-Monteith. Οι μετεωρολογικές παρατηρήσεις πρέπει να γίνονται σε κατάλληλο περιβάλλον αρδευόμενων γεωργικών εκτάσεων και με τις προδιαγραφές που απαιτεί η μέθοδος, διαφορετικά πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες προσαρμογές της θερμοκρασίας του αέρα, της υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου.

Για περιοχικές προσαρμογές, χρησιμοποιούνται απλές γραμμικές σχέσεις που συνδέουν την ET_r που δίνει η εξεταζόμενη μέθοδος προς αυτή που δίνει η μέθοδος Penman-Monteith και έχουν τη μορφή

$$ET_o = bET_x \quad (6.25)$$

ή

$$ET_o = a + bET_x \quad (6.26)$$

όπου ET_o είναι η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς που υπολογίζεται με τη μέθοδο Penman-Monteith και ET_x είναι αυτή που υπολογίζεται με την όποια άλλη μέθοδο. Κατά κανόνα, προτιμάται η σχέση (6.25) οπότε η αντιστοίχιση γίνεται με τον απλό παράγοντα προσαρμογής

$$b = \frac{ET_o}{ET_x} \quad (6.27)$$

Οι παράγοντες προσαρμογής, b , μπορεί να είναι ενιαίοι ή να διαφέρουν από μήνα σε μήνα. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε από τους Allen και Brockway (1983) και από τους Jensen et al.. (1990). Ο Παπαζαφειρίου (1998, δημοσίευτα στοιχεία) την εφάρμοσε για την προσαρμογή της μεθόδου Blaney-Griddle κατά FAO-24 σε διάφορες θέσεις στην Ελλάδα και υπολόγισε το b τόσο σε εποχιακή όσο και μηνιαία βάση.

Πριν κλείσει το κεφάλαιο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι η συνδυασμένη μέθοδος Penman-Monteith αναφέρεται σε μια υποθετική καλλιέργεια που προσομοιάζει τον χορτοτάπητα. Για το λόγο αυτό, οι μετεωρολογικές παρατηρήσεις πρέπει να παίρνονται πάνω από μια τέτοια επιφάνεια. Το μειονέκτημα υπολογισμοί της ET_r που βασίζεται σε μετεωρολογικά δεδομένα είναι ότι σφάλματα στη μέτρηση των μετεωρολογικών παραμέτρων όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία, R_s , η θερμοκρασία του αέρα, T , η σχετική υγρασία, $R.H$, και η ταχύτητα του ανέμου, U , ή σφάλματα στον υπολογισμό της καθαρής ακτινοβολίας, R_n , οδηγούν σε σφάλματα υπολογισμού της ET_r . Από την άλλη μεριά, η χρήση λυσίμετρων έχει μεγάλες απαιτήσεις. Κατά κανόνα τα σφάλματα που προκύπτουν από κακής ποιότητας λυσιμετρικά δεδομένα είναι μεγαλύτερα από αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου Penman-Monteith με βάση πτωχές μετεωρολογικές παρατηρήσεις. Για το λόγο αυτό η μέθοδος αυτή θεωρείται ότι υπερτερεί σε ακρίβεια σε σχέση με τα περισσότερα λυσιμετρικά δεδομένα προσδιορισμού της ET_r .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο ΕΦΑΡΜΟΓΗ

7.1. ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής για την πενταετία 2000-2004 για κάθε έτος και για την καλλιεργητική περίοδο από 1/5-31/8 όπου συμπίπτει με την περίοδο άρδευσης των περισσότερων καλλιεργειών στην Ελλάδα.

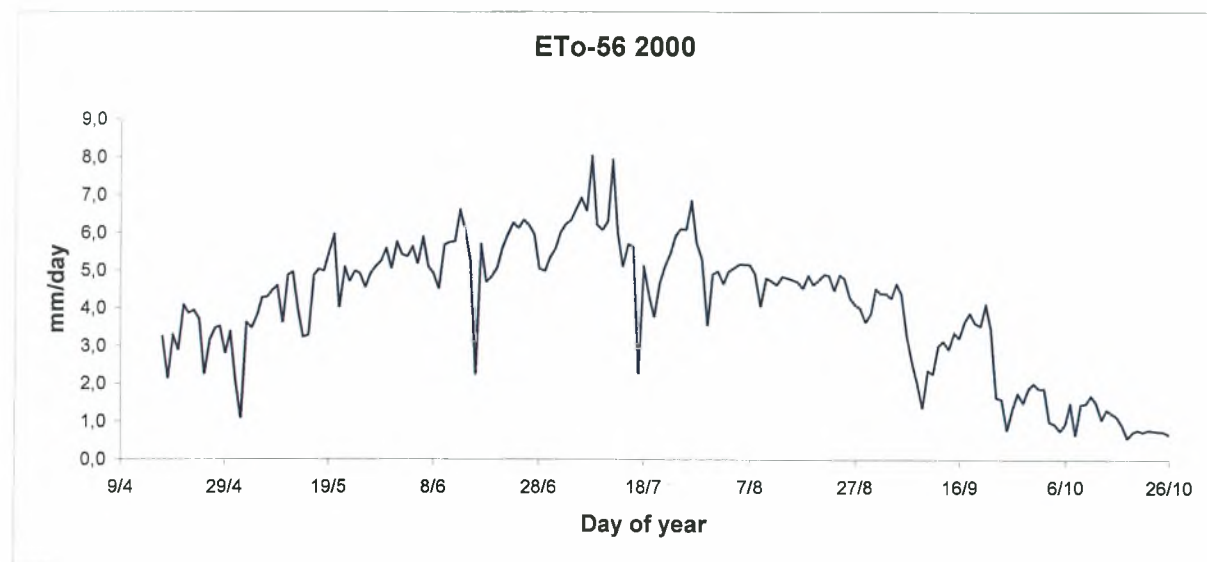
Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήσαμε την πολύπλοκη μαθηματική εξίσωση Penman-Monteith όπως αυτή αναλύθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια βασιζόμενοι σε μετεωρολογικά στοιχεία τα οποία ελήφθησαν από το μετεωρολογικό σταθμό της σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στην περιοχή του Βελεστίνου Μαγνησίας.

Επίσης έγινε υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής και με τις υπόλοιπες μεθόδους που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και σύγκριση αυτών με την συνδυασμένη μέθοδο Penman-Monteith που όπως αναφέρθηκε θεωρείται ως η πιο ακριβής.

Τέλος με βάση την εξατμισοδιαπνοή υπολογιζόμενη με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman-Monteith έγινε προγραμματισμός άρδευσης για καλλιέργεια βαμβακιού στην περιοχή του Βελεστίνου με τη βοήθεια του προγράμματος EXCEL.

Τα χαρακτηριστικά του αγροκτήματος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας είναι τα ακόλουθα. Υδατοϊκανότητα 0.215mm, Σημείο Μόνιμης Μάρανσης 0.118mm, Φαινόμενο Ειδικό Βάρος 0.121mm, μηχανικής σύστασης Αργιλοπηλώδες και με Διαθέσιμη Υγρασία 93.8mm.

7.2 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός άρδευσης για καλλιέργεια βαμβακιού το έτος 2000.

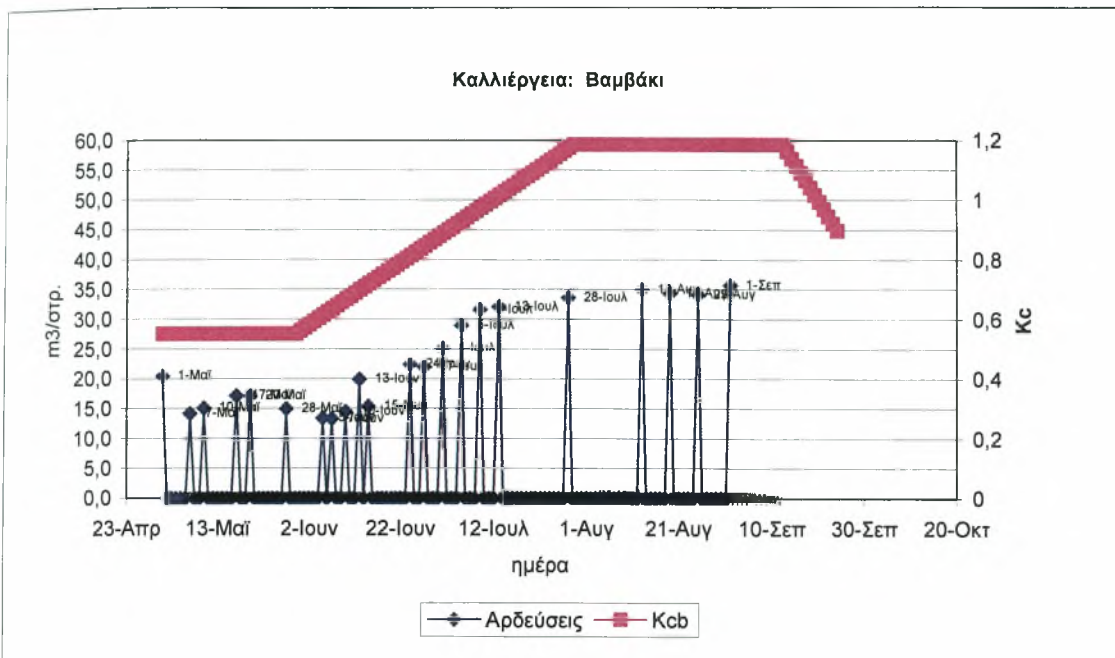


Διάγραμμα 7.2.1 Ημερήσια εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για το έτος 2000.

Στον πίνακα 7.2.2 αναφέρεται η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για τους μήνες Μάιο έως Αύγουστο του έτους 2000 υπολογισμένη με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith FAO-56, βασιζόμενη σε μετεωρολογικά δεδομένα που ελήφθησαν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό.

Μήνας	ET (mm)
Μάιος	134,7
Ιούνιος	163,1
Ιούλιος	171,8
Αύγουστος	140,4
Σύνολο	610,0

Πίνακας 7.2.2 Μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για την καλλιεργητική περίοδο 2000.



Διάγραμμα 7.2.3 Παραγραμματισμός άρδευσης για το έτος 2000.

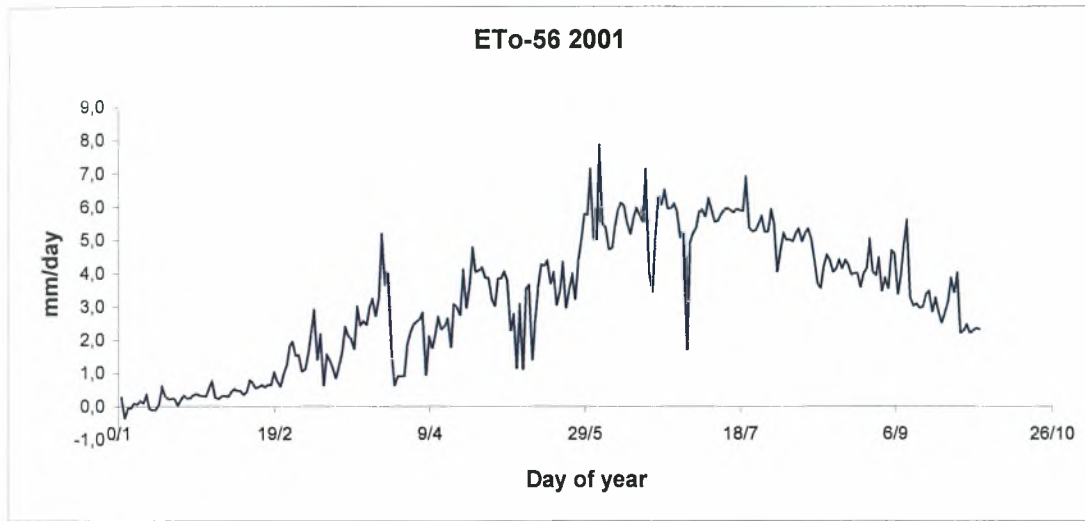
Ο προγραμματισμός της άρδευσης βασίσθηκε στην εξατμισοδιαπνοή που υπολογίστηκε παραπάνω με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith FAO-56 και σε μετεωρολογικά δεδομένα όπως η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου μετρημένη σε ύψος δύο μέτρων πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και η βροχόπτωση, δεδομένα που ελήφθησαν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό. Παρουσιάζεται επίσης διαγραμματικά και η τιμή του φυτικού συντελεστή K_c για τα διάφορα στάδια ανάπτυξης.

Στον πίνακα 7.2.4 παρουσιάζονται μετρήσεις του ύψους του νερού άρδευσης και βροχόπτωσης ημερολογιακά καθώς και το συνολικό ύψος αυτών στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 7.2.3.

Πίνακας 7.2.4 Μετρήσεις Βροχόπτωσης- Άρδευσης.

Έτος	Βροχόπτωση (mm/day)	Άρδευση (mm/στρέμμα)
1/5/00	-	20,48
2/5/00	0,77	-
3/5/00	6,94	-
7/5/00	-	14,22
10/5/00	-	15,14
13/5/00	15,5	-
14/5/00	0,78	-
17/5/00	-	17,19
20/5/00	-	17,14
23/5/00	28,43	-
28/5/00	-	15,01
29/5/00	22,46	-
5/6/00	-	13,41
7/6/00	-	13,33
8/6/00	2,18	-
10/6/00	-	14,51
13/6/00	-	19,96
15/6/00	-	15,43
16/6/00	25,63	-
17/6/00	2,17	-
24/6/00	-	22,43
27/6/00	-	22,02
1/7/00	-	25,16
5/7/00	-	28,98
6/7/00	2,38	-
9/7/00	-	31,63
13/7/00	-	32,13
17/7/00	42,17	-
18/7/00	0,19	-
19/7/00	1,77	-
21/7/00	0,19	-
22/7/00	13,12	-
27/7/00	2,38	-
28/7/00	-	33,67
1/8/00	0,19	-
2/8/00	60,46	-
13/8/00	-	35,00
18/8/00	0,98	-
19/8/00	-	34,36
24/8/00	1,19	-
25/8/00	-	34,15
30/8/00	0,39	-
1/9/00	-	35,75
Σύνολο	230,27	511,12

7.3 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός άρδευσης για καλλιέργεια βαμβακιού το έτος 2001.

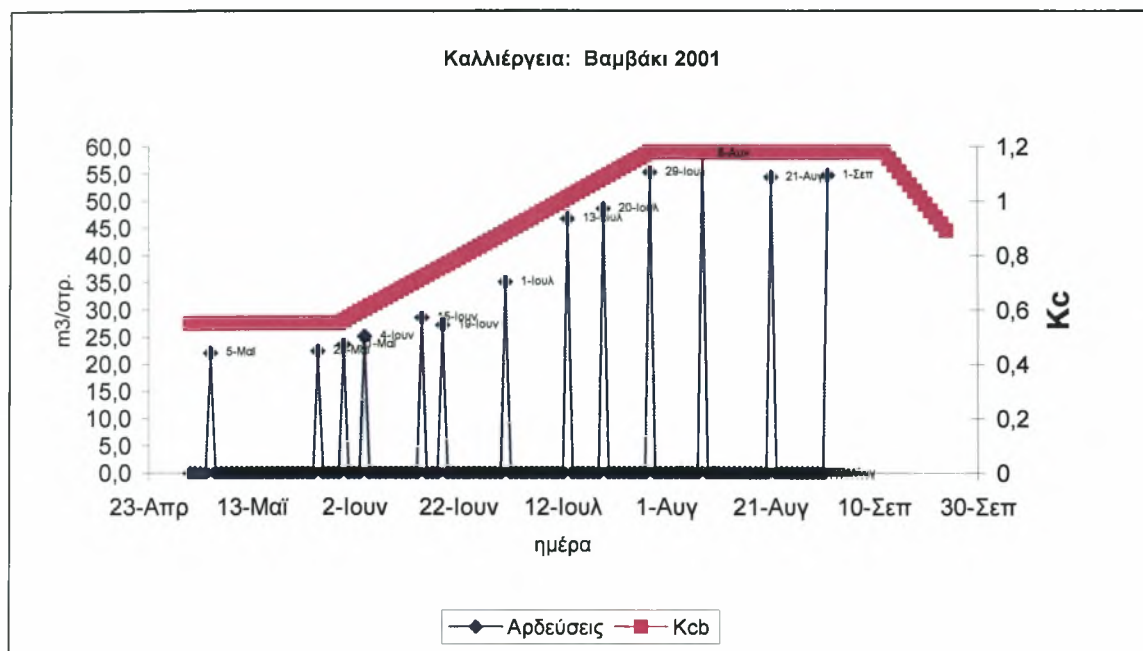


Διάγραμμα 7.3.1 Ημερήσια εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για το έτος 2001.

Στον πίνακα 7.3.2 αναφέρεται η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για τους μήνες Μάιο έως Αύγουστο του έτους 2001 υπολογισμένη με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith FAO-56, βασιζόμενη σε μετεωρολογικά δεδομένα που ελήφθησαν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό.

Μήνας	ET (mm)
Μάιος	107,3
Ιούνιος	170,4
Ιούλιος	165,5
Αύγουστος	134,7
Σύνολο	577,9

Πίνακας 7.3.2 Μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για την καλλιεργητική περίοδο 2001.



Διάγραμμα 7.3.3 Παραγραμματισμός άρδευσης για το έτος 2001.

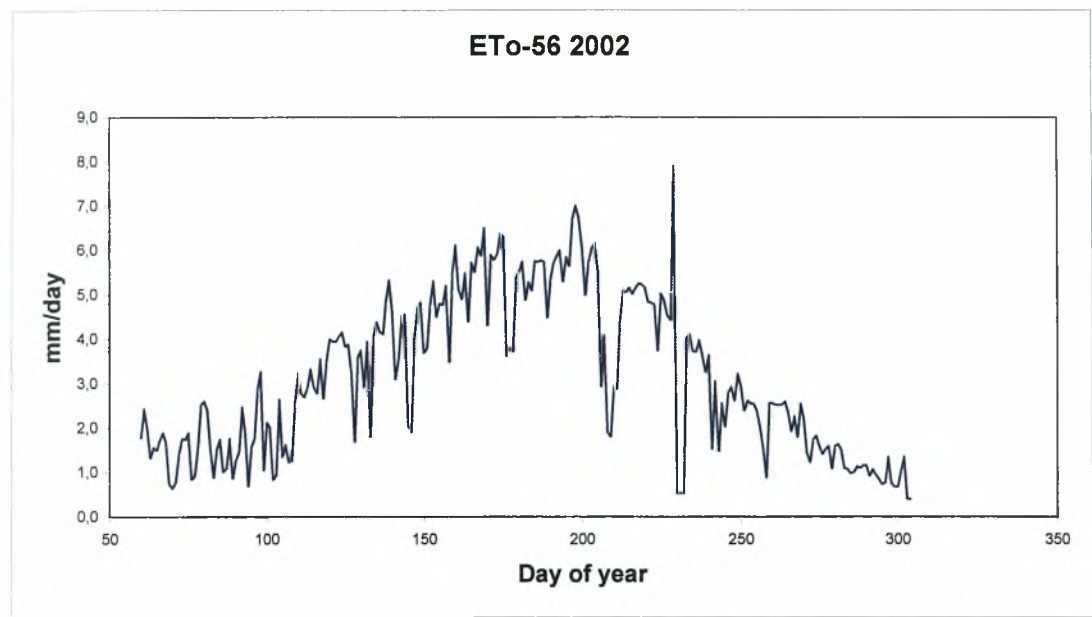
Ο προγραμματισμός της άρδευσης βασίσθηκε στην εξατμισοδιαπνοή που υπολογίστηκε παραπάνω με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith FAO-56 και σε μετεωρολογικά δεδομένα όπως η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου μετρημένη σε ύψος δύο μέτρων πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και η βροχόπτωση, δεδομένα που ελήφθησαν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό. Παρουσιάζεται επίσης διαγραμματικά και η τιμή του φυτικού συντελεστή K_c για τα διάφορα στάδια ανάπτυξης.

Στον πίνακα 7.3.4 παρουσιάζονται μετρήσεις του ύψους του νερού άρδευσης και βροχόπτωσης ημερολογιακά καθώς και το συνολικό ύψος αυτών στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 7.3.3.

Πίνακας 7.3.4 Μετρήσεις Βροχόπτωσης- Άρδευσης.

Ημερομηνία	Βροχόπτωση (mm/day)	Άρδευση (mm/στρέμμα)
1/5/2001	7,1	-
2/5/2001	2,96	-
5/5/2001	0,19	-
6/5/2001	0,78	-
8/5/2001	0,19	-
9/5/2001	26,01	-
10/5/2001	5,35	-
12/5/2001	3,54	-
13/5/2001	8,13	-
15/5/2001	1,56	-
22/5/2001	1,77	-
26/5/2001	-	22,41
31/5/2001	-	23,65
4/6/2001	-	25,16
5/6/2001	19,84	-
6/6/2001	1,17	-
7/6/2001	2,56	-
8/6/2001	3,38	-
9/6/2001	8,09	-
12/6/2001	1,76	-
13/6/2001	5,95	-
15/6/2001	-	28,57
18/6/2001	0,59	-
19/6/2001	-	27,23
21/6/2001	0,19	-
22/6/2001	6,36	-
25/6/2001	9,72	-
26/6/2001	24,83	-
1/7/2001	-	35,12
2/7/2001	24,25	-
3/7/2001	0,19	-
13/7/2001	-	46,78
20/7/2001	-	48,63
26/7/2001	4,97	-
29/7/2001	-	55,27
31/7/2001	0,19	-
1/8/2001	2,37	-
8/8/2001	-	58,74
12/8/2001	6,55	-
13/8/2001	9,33	-
21/8/2001	-	54,48
22/8/2001	0,79	-
1/9/2001	-	54,81
Σύνολο	190,66	502,99

7.4 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός άρδευσης για καλλιέργεια βαμβακιού το έτος 2002.



Διάγραμμα 7.4.1 Ημερήσια εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για το έτος 2002.

Στον πίνακα 7.4.2 αναφέρεται η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για τους μήνες Μάιο έως Αύγουστο του έτους 2002 υπολογισμένη με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith FAO-56, βασιζόμενη σε μετεωρολογικά δεδομένα που ελήφθησαν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό.

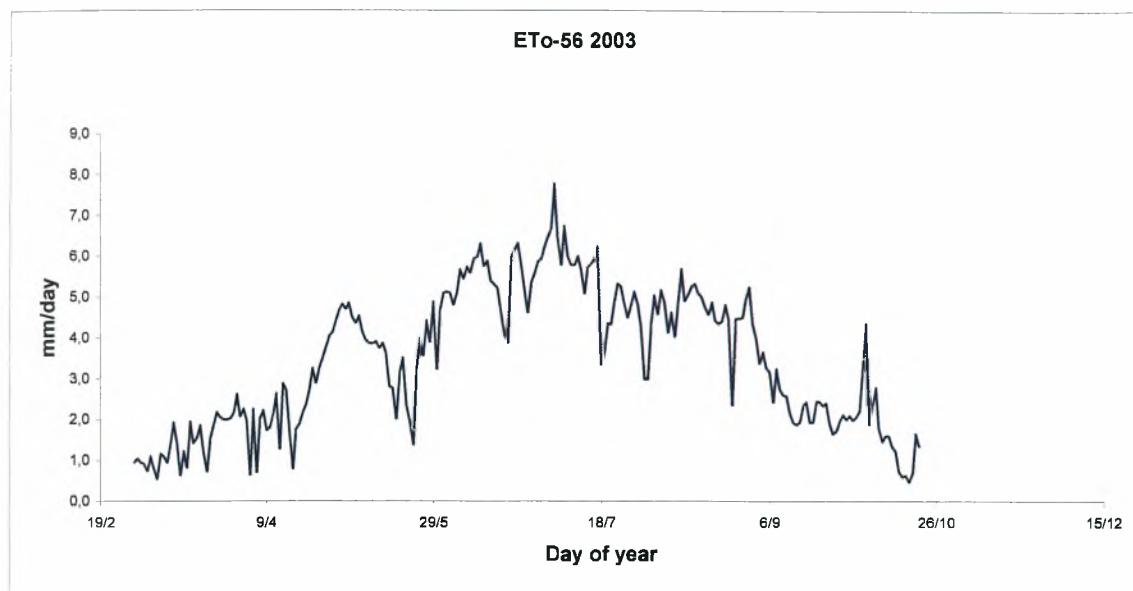
Μήνας	ET (mm)
Μάιος	117,2
Ιούνιος	156,7
Ιούλιος	158,6
Αύγουστος	124,0
Σύνολο	556,5

Πίνακας 7.4.2 Μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για την καλλιεργητική περίοδο 2002.

Πίνακας 7.4.4 Μετρήσεις Βροχόπτωσης- Άρδευσης.

	Βροχόπτωση (mm/day)	Άρδεύσεις (mm/στρέμμα)
1/5/2002	-	20,90
4/5/2002	-	13,96
5/5/2002	0,19	-
8/5/2002	2,31	-
9/5/2002	0,19	15,25
12/5/2002	1,77	-
13/5/2002	1,97	-
14/5/2002	6,94	-
15/5/2002	-	13,82
18/5/2002	-	14,99
20/5/2002	2,38	-
21/5/2002	1,15	-
22/5/2002	1,57	14,21
25/5/2002	0,78	-
26/5/2002	2,74	-
27/5/2002	-	15,69
30/5/2002	-	14,77
2/6/2002	0,39	15,54
3/6/2002	0,19	-
5/6/2002	-	16,02
8/6/2002	-	16,50
10/6/2002	1,38	-
11/6/2002	-	17,87
14/6/2002	-	18,09
16/6/2002	3,76	-
17/6/2002	-	16,96
20/6/2002	-	19,25
22/6/2002	-	-
23/6/2002	-	21,25
25/6/2002	0,39	-
28/6/2002	-	26,16
1/7/2002	0,59	-
2/7/2002	-	24,48
6/7/2002	-	26,33
7/7/2002	2,57	-
8/7/2002	0,96	-
11/7/2002	-	28,36
13/7/2002	0,39	-
16/7/2002	-	34,38
20/7/2002	0,19	-
21/7/2002	-	35,82
25/7/2002	2,36	-
26/7/2002	2,76	-
27/7/2002	56,62	-
28/7/2002	25,98	-
29/7/2002	1,56	-
31/7/2002	3,57	-
1/8/2002	0,19	-
14/8/2002	-	34,05
16/8/2002	14,91	-
17/8/2002	15,1	-
29/8/2002	2,56	-
30/8/2002	0,19	-
31/8/2002	0,58	-
1/9/2002	0	34,50
Σύνολο	159,18	509,14

7.5 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός άρδευσης για καλλιέργεια βαμβακιού το έτος 2003.

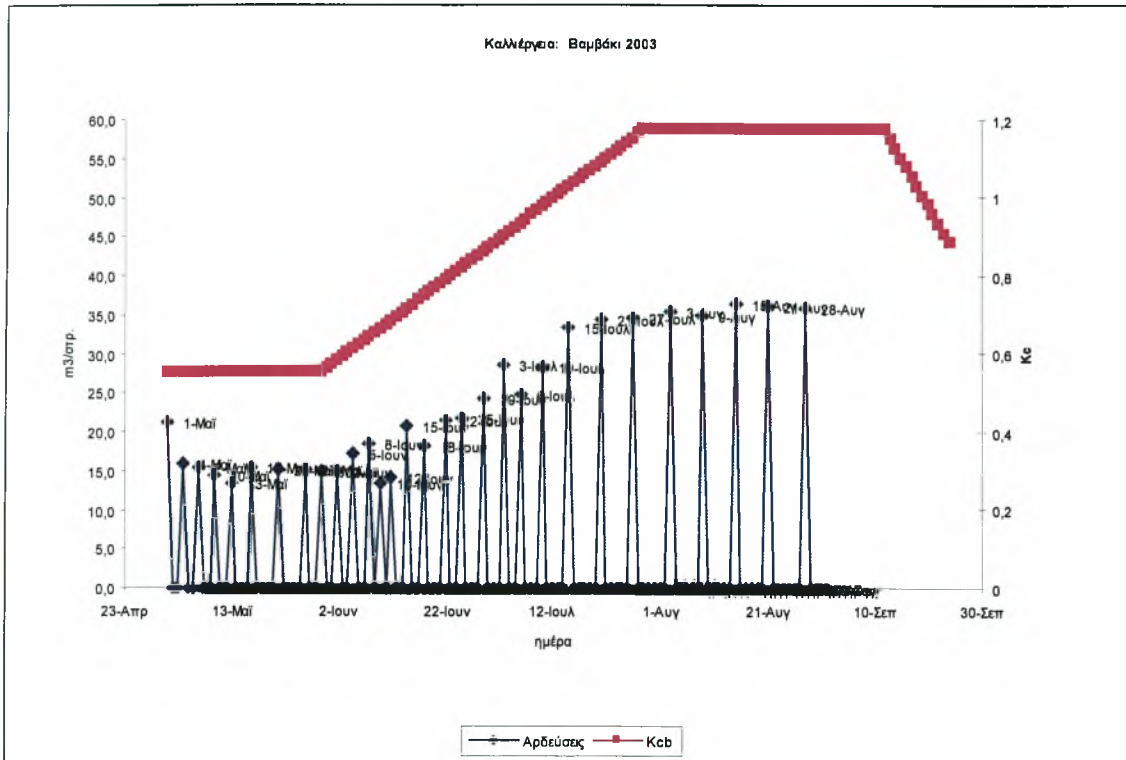


Διάγραμμα 7.5.1 Ημερήσια εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για το έτος 2003.

Στον πίνακα 7.5.2 αναφέρεται η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για τους μήνες Μάιο έως Αύγουστο του έτους 2003 υπολογισμένη με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith FAO-56, βασιζόμενη σε μετεωρολογικά δεδομένα που ελήφθησαν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό.

Μήνας	ET (mm)
Μάιος	115,3
Ιούνιος	162,0
Ιούλιος	170,0
Αύγουστος	141,8
Σύνολο	589,1

Πίνακας 7.5.2 Μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για την καλλιεργητική περίοδο 2003.



Διάγραμμα 7.5.3 Παραγραμματισμός άρδευσης για το έτος 2003.

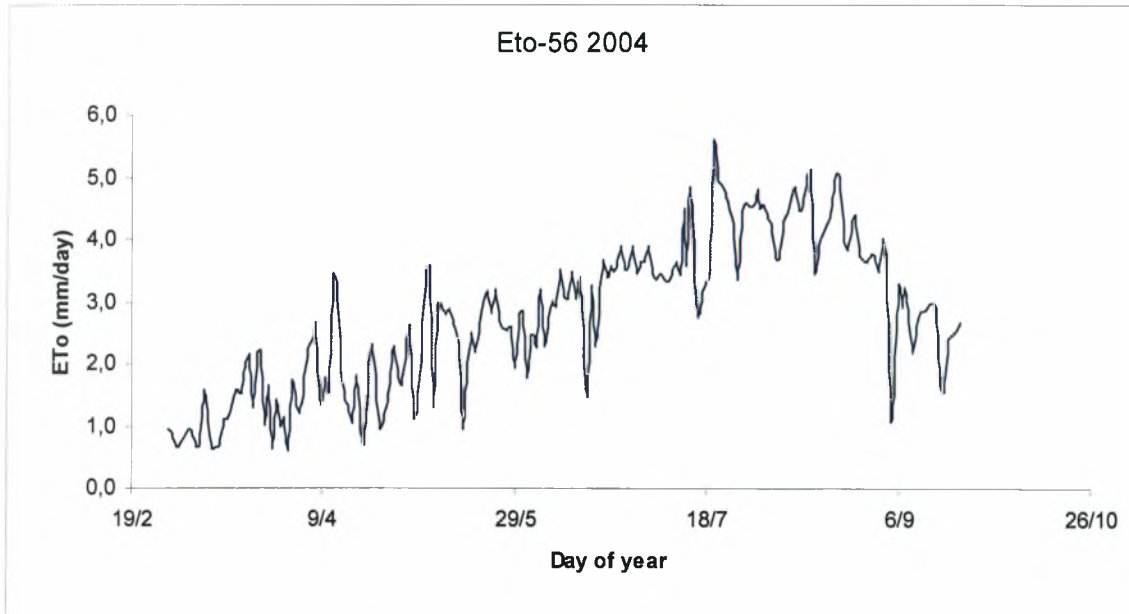
Ο προγραμματισμός της άρδευσης βασίσθηκε στην εξατμισοδιαπνοή που υπολογίστηκε παραπάνω με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith FAO-56 και σε μετεωρολογικά δεδομένα όπως η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου μετρημένη σε ύψος δύο μέτρων πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και η βροχόπτωση, δεδομένα που ελήφθησαν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό. Παρουσιάζεται επίσης διαγραμματικά και η τιμή του φυτικού συντελεστή K_c για τα διάφορα στάδια ανάπτυξης.

Στον πίνακα 7.5.4 παρουσιάζονται μετρήσεις του ύψους του νερού άρδευσης και βροχόπτωσης ημερολογιακά καθώς και το συνολικό ύψος αυτών στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 7.5.3.

Πίνακας 7.5.4 Μετρήσεις Βροχόπτωσης- Άρδευσης.

	<i>Βροχόπτωση (mm/day)</i>	<i>Άρδευση (mm/στρέμμα)</i>
1/5/2003	0	21,26
4/5/2003	0	15,92
7/5/2003	0	15,33
10/5/2003	0	14,39
13/5/2003	0	13,44
17/5/2003	0	15,54
22/5/2003	0	15,23
23/5/2003	0,19	0,00
27/5/2003	0	15,22
30/5/2003	0	14,87
2/6/2003	0	14,99
5/6/2003	0	17,11
8/6/2003	0	18,60
10/6/2003	0	13,50
12/6/2003	0	14,20
15/6/2003	0	20,67
18/6/2003	0	18,30
22/6/2003	0	21,50
25/6/2003	0	21,81
29/6/2003	0	24,32
3/7/2003	0	28,69
6/7/2003	0	24,79
10/7/2003	0	28,35
15/7/2003	0	33,33
21/7/2003	0	34,49
27/7/2003	0	34,64
30/7/2003	0,19	0,00
2/8/2003	0,19	0,00
3/8/2003	0	35,54
9/8/2003	0	34,83
10/8/2003	0,19	0,00
15/8/2003	0	36,34
21/8/2003	0	36,27
28/8/2003	0	35,84
Σύνολο	0,76	689,32

7.6 Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς και προγραμματισμός άρδευσης για καλλιέργεια βαμβακιού το έτος 2004.

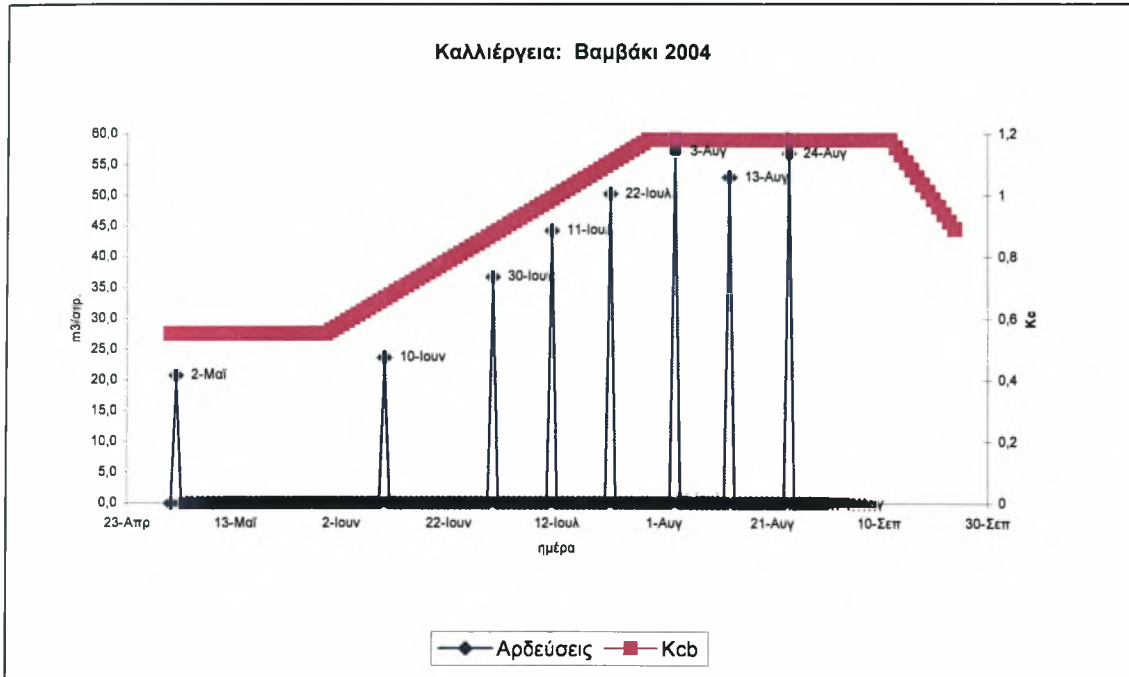


Διάγραμμα 7.6.1 Ημερήσια εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για το έτος 2004.

Στον πίνακα 7.6.2 αναφέρεται η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για τους μήνες Μάιο έως Αύγουστο του έτους 2004 υπολογισμένη με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith FAO-56, βασιζόμενη σε μετεωρολογικά δεδομένα που ελήφθησαν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό.

Μήνας	ET (mm)
Μάιος	75,6
Ιούνιος	90,8
Ιούλιος	122,1
Αύγουστος	133,8
Σύνολο	402,1

Πίνακας 7.6.2 Μηνιαία εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς για την καλλιεργητική περίοδο 2004.



Διάγραμμα 7.6.3 Παραγραμματισμός άρδευσης για το έτος 2004.

Ο προγραμματισμός της άρδευσης βασίσθηκε στην εξαμισοδιαπνοή που υπολογίστηκε παραπάνω με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman- Monteith FAO-56 και σε μετεωρολογικά δεδομένα όπως η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία, η ταχύτητα του ανέμου μετρημένη σε ύψος δύο μέτρων πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και η βροχόπτωση, δεδομένα που ελήφθησαν από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό. Παρουσιάζεται επίσης διαγραμματικά και η τιμή του φυτικού συντελεστή K_c για τα διάφορα στάδια ανάπτυξης.

Στον πίνακα 7.6.4 παρουσιάζονται μετρήσεις του ύψους του νερού άρδευσης και βροχόπτωσης ημερολογιακά καθώς και το συνολικό ύψος αυτών στη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 7.6.3.

Πίνακας 7.6.4 Μετρήσεις Βροχόπτωσης- Άρδευσης.

Ημερομηνία	Βροχόπτωση (mm/day)	Άρδευση (mm/στρέμμα)
2/5/2004	0	20,82
4/5/2004	1,6	0,00
5/5/2004	26,2	0,00
6/5/2004	0,2	0,00
9/5/2004	2,4	0,00
10/5/2004	0,2	0,00
14/5/2004	5,6	0,00
16/5/2004	5,8	0,00
17/5/2004	8,8	0,00
18/5/2004	14,4	0,00
19/5/2004	0,2	0,00
24/5/2004	0,2	0,00
29/5/2004	0,2	0,00
30/5/2004	3,8	0,00
3/6/2004	0,2	0,00
4/6/2004	3,2	0,00
5/6/2004	6,2	0,00
6/6/2004	0,2	0,00
7/6/2004	4	0,00
8/6/2004	0,2	0,00
10/6/2004	0	23,66
13/6/2004	3,4	0,00
14/6/2004	0,2	0,00
17/6/2004	1,4	0,00
18/6/2004	15,8	0,00
20/6/2004	15,2	0,00
21/6/2004	0,2	0,00
27/6/2004	1,6	0,00
30/6/2004	0,4	36,82
11/7/2004	0	44,30
22/7/2004	0	50,28
3/8/2004	0	57,17
5/8/2004	0,2	0,00
13/8/2004	0	52,97
16/8/2004	3,2	0,00
24/8/2004	0	56,86
27/8/2004	1,2	0,00
Σύνολο	126,4	342,87

7.7 Μηνιαία εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με διάφορες μεθόδους.

B-C SCS (mm•d ⁻¹)	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	4,32	4,04	3,93	4,43	3,52
Ιούνιος	5,75	5,73	5,97	6,23	5,69
Ιούλιος	6,95	6,92	6,75	6,83	6,49
Αύγουστος	5,57	5,92	5,09	6,06	5,55
Σεπτέμβριος	3,88	4,05	3,54	3,57	3,58

B-C FAO-24 (mm•d ⁻¹)	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	4,22	4,77	4,73	5,05	4,85
Ιούνιος	5,80	7,20	6,92	6,79	6,93
Ιούλιος	6,42	7,33	6,58	6,89	7,66
Αύγουστος	6,68	6,34	5,15	6,31	6,90
Σεπτέμβριος	4,93	5,29	3,38	4,20	5,00

ΜΑΚΚΙΝΚ (mm•d ⁻¹)	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	5,80	4,40	4,81	4,48	2,70
Ιούνιος	7,34	7,34	6,59	6,75	3,26
Ιούλιος	7,16	6,87	6,33	6,87	4,64
Αύγουστος	6,36	5,83	4,85	5,83	5,58
Σεπτέμβριος	3,72	3,28	2,92	3,28	3,49

PENMAN (mm•d ⁻¹)	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	2,77	2,25	2,31	2,27	1,68
Ιούνιος	3,53	3,72	3,19	3,22	2,05
Ιούλιος	3,89	3,49	3,01	3,31	2,80
Αύγουστος	3,08	2,87	2,39	2,84	2,95
Σεπτέμβριος	2,35	2,60	1,34	1,78	2,02

PENMAN FAO-24 (mm•d ⁻¹)	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	5,39	4,14	4,47	4,17	2,44
Ιούνιος	7,05	7,55	6,47	6,71	3,00
Ιούλιος	7,33	6,84	6,00	6,76	4,43
Αύγουστος	5,62	5,16	4,55	5,25	5,01
Σεπτέμβριος	3,58	4,19	2,10	2,79	3,02

PENMAN- MONTEITH (mm•d ⁻¹)	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	1,04	0,95	0,98	0,96	0,895
Ιούνιος	1,16	1,15	1,09	1,08	0,972
Ιούλιος	1,24	1,16	1,08	1,11	1,129
Αύγουστος	1,12	1,06	1,02	1,06	1,109
Σεπτέμβριος	1,01	1,02	0,83	0,90	0,967

Hargreaves (mm•d ⁻¹)	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	12,39	11,08	11,57	12,42	11,57
Ιούνιος	15,21	14,52	14,88	15,35	15,45
Ιούλιος	16,06	14,70	14,73	14,72	15,18
Αύγουστος	12,81	12,39	10,87	12,50	12,62
Σεπτέμβριος	8,48	8,83	7,35	7,67	7,98

Priestley- Taylor	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	7,75	6,58	7,24	6,73	4,35
Ιούνιος	8,60	8,77	8,68	9,08	4,86
Ιούλιος	8,15	8,50	8,39	8,84	5,75
Αύγουστος	7,05	6,96	6,94	7,21	6,22
Σεπτέμβριος	4,14	4,82	4,31	4,17	3,88

Jensen-Haise (mm·d ⁻¹)	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	13,98	11,02	15,12	11,89	6,00
Ιούνιος	17,55	17,89	19,14	18,69	8,65
Ιούλιος	18,74	18,95	17,43	19,34	11,86
Αύγουστος	16,17	15,80	13,96	16,49	14,07
Σεπτέμβριος	10,00	12,01	7,10	8,87	8,67

PENMAN-MONTEITH FAO (mm·d ⁻¹)	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	2,34	1,92	1,96	1,93	1,34
Ιούνιος	3,04	3,31	2,75	2,80	1,58
Ιούλιος	3,39	3,01	2,57	2,87	2,21
Αύγουστος	2,62	2,44	1,93	2,42	2,48
Σεπτέμβριος	1,93	2,23	1,07	1,50	1,61

7.8 Συντελεστές προσαρμογής.

b _{B-C} scs	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	0,54	0,48	0,50	0,44	0,38
Ιούνιος	0,53	0,58	0,46	0,45	0,28
Ιούλιος	0,49	0,44	0,38	0,42	0,34
Αύγουστος	0,47	0,41	0,38	0,40	0,45
Σεπτέμβριος	0,50	0,55	0,30	0,42	0,45

b _{B-C} FAO-24	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	0,56	0,40	0,41	0,38	0,28
Ιούνιος	0,53	0,46	0,40	0,41	0,23
Ιούλιος	0,53	0,41	0,39	0,42	0,29
Αύγουστος	0,39	0,39	0,37	0,38	0,36
Σεπτέμβριος	0,39	0,42	0,32	0,36	0,32

b ΜΑΚΚΙΝΚ	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	0,40	0,44	0,41	0,43	0,49
Ιούνιος	0,41	0,45	0,42	0,41	0,49
Ιούλιος	0,47	0,44	0,41	0,42	0,48
Αύγουστος	0,41	0,42	0,40	0,42	0,44
Σεπτέμβριος	0,52	0,68	0,37	0,46	0,46

b PENMAN	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	0,85	0,85	0,85	0,85	0,80
Ιούνιος	0,86	0,89	0,86	0,87	0,77
Ιούλιος	0,87	0,86	0,85	0,87	0,79
Αύγουστος	0,85	0,85	0,81	0,85	0,84
Σεπτέμβριος	0,82	0,86	0,80	0,84	0,79

b PENMAN FAO-24	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	0,43	0,46	0,44	0,46	0,55
Ιούνιος	0,43	0,44	0,43	0,42	0,53
Ιούλιος	0,46	0,44	0,43	0,42	0,50
Αύγουστος	0,47	0,47	0,42	0,46	0,49
Σεπτέμβριος	0,54	0,53	0,51	0,54	0,53

b PENMAN- MONTEITH	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	2,25	2,02	2,00	2,00	1,49
Ιούνιος	2,62	2,88	2,52	2,58	1,63
Ιούλιος	2,74	2,61	2,37	2,59	1,95
Αύγουστος	2,35	2,30	1,89	2,29	2,23
Σεπτέμβριος	1,91	2,18	1,29	1,67	1,66

bHAGREAVES	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	0,19	0,17	0,17	0,16	0,12
Ιούνιος	0,20	0,23	0,18	0,18	0,10
Ιούλιος	0,21	0,21	0,17	0,19	0,15
Αύγουστος	0,20	0,20	0,18	0,19	0,20
Σεπτέμβριος	0,23	0,25	0,15	0,20	0,20

bPRIESTLEY-TAYLOR	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	0,30	0,29	0,27	0,29	0,31
Ιούνιος	0,35	0,38	0,32	0,31	0,33
Ιούλιος	0,42	0,35	0,31	0,32	0,38
Αύγουστος	0,37	0,35	0,28	0,34	0,40
Σεπτέμβριος	0,47	0,46	0,25	0,36	0,41

bJENSEN-HAIDES	2000	2001	2002	2003	2004
Μάιος	0,17	0,17	0,13	0,16	0,22
Ιούνιος	0,17	0,19	0,14	0,15	0,18
Ιούλιος	0,18	0,16	0,15	0,15	0,19
Αύγουστος	0,16	0,15	0,14	0,15	0,18
Σεπτέμβριος	0,19	0,19	0,15	0,17	0,19

7.9 Μέσος όρος των μηνιαίων συντελεστών προσαρμογής (b) για την πενταετία 2000-2004

B-C SCS	b (average)	B-C FAO-24	b (average)
Μάιος	0,47	Μάιος	0,41
Ιούνιος	0,46	Ιούνιος	0,40
Ιούλιος	0,41	Ιούλιος	0,41
Αύγουστος	0,42	Αύγουστος	0,38
Σεπτέμβριος	0,44	Σεπτέμβριος	0,36

MAKKINK	b (average)	PENMAN	b (average)
Μάιος	0,43	Μάιος	0,84
Ιούνιος	0,44	Ιούνιος	0,85
Ιούλιος	0,44	Ιούλιος	0,85
Αύγουστος	0,42	Αύγουστος	0,84
Σεπτέμβριος	0,50	Σεπτέμβριος	0,82

PENMAN FAO-24	b (average)	PENMAN- MONTEITH	b (average)
Μάιος	0,47	Μάιος	1,95
Ιούνιος	0,45	Ιούνιος	2,45
Ιούλιος	0,45	Ιούλιος	2,45
Αύγουστος	0,46	Αύγουστος	2,21
Σεπτέμβριος	0,53	Σεπτέμβριος	1,74

HARGREAVES	b (average)	PRIESTLEY- TAYLOR	b (average)
Μάιος	0,16	Μάιος	0,29
Ιούνιος	0,18	Ιούνιος	0,34
Ιούλιος	0,19	Ιούλιος	0,36
Αύγουστος	0,19	Αύγουστος	0,35
Σεπτέμβριος	0,20	Σεπτέμβριος	0,39

JENSEN- HAIDES	b (average)
Μάιος	0,17
Ιούνιος	0,17
Ιούλιος	0,16
Αύγουστος	0,16
Σεπτέμβριος	0,18

7.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής απαιτεί πληθώρα μετεωρολογικών παραμέτρων, οι οποίες λαμβάνονται με ωριαίες έως και μηνιαίες τιμές από τους αυτομάτους μετεωρολογικούς σταθμούς.
- Σήμερα έχουμε τη δυνατότητα με τους αυτόματους μετεωρολογικούς σταθμούς και τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών και του λογισμικού που διαθέτουν, να λαμβάνουμε τα δεδομένα, να τα εισάγουμε στο πρόγραμμα υπολογισμού της ET₀ και στη συνέχεια στο πρόγραμμα άρδευσης, κάνοντας έναν ορθολογικό σχεδιασμό της άρδευσης της κάθε καλλιέργειας.
- Η πλέον ακριβής μέθοδος υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, είναι η συνδυασμένη μέθοδος ET₀ Penman-Monteith FAO-56, τα αποτελέσματα της οποίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τους φυτικούς συντελεστές k_c (κεφάλαιο 5) για κάθε καλλιέργεια, υπολογίζοντας την εξατμισοδιαπνοή αυτής.
- Οι υπόλοιπες μέθοδοι υπερεκτιμούν την εξατμισοδιαπνοή σε σύγκριση με τη συνδυασμένη μέθοδο Penman-Monteith FAO-56, αλλά χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις αυτών σε συνδυασμό με τους συντελεστές προσαρμογής, όπως αυτοί υπολογίστηκαν πιο πάνω, γίνεται όσο το δυνατό αντιπροσωπευτικότερη η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής, όταν λείπουν ορισμένα απαραίτητα για τον υπολογισμό της κλιματικά δεδομένα.
- Υπολογίζοντας την εξατμισοδιαπνοή της κάθε καλλιέργειας και σχεδιάζοντας ένα ορθολογικό πρόγραμμα άρδευσης πετυχαίνουμε την οικονομία του αρδευτικού νερού με όλες τις ευεργετικές συνέπειες που έχει αυτή για το περιβάλλον και βελτιώνουμε την οικονομικότητα της καλλιέργειας.
- Στη σύγχρονη γεωργία που στόχος είναι η αύξηση της ανταγωνιστικότητας των προϊόντων, η βελτιστοποίηση της ποιότητας και η επίτευξη ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης της παραγωγής, ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια, ώστε να εφοδιάζονται οι καλλιέργειες με τις απαραίτητες ποσότητες νερού για την ανάπτυξή τους, θα έχει σημαντική συμβολή.

- Παρατηρώντας τον προγραμματισμό των αρδεύσεων, βασιζόμενο στην εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς που εκτιμάται βάση των μετεωρολογικών δεδομένων που λαμβάνονται από αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό, τη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αέρος, την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος δύο μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους και το ύψος της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια των σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας συμπεραίνεται πως το συνολικό ύψος νερού των αρδεύσεων είναι αντιστρόφως ανάλογο του συνολικού ύψους βροχόπτωσης.
- Από τον προγραμματισμό των αρδεύσεων γίνεται αντιληπτό πως η αρδευτική περίοδος ξεκινά με μία άρδευση σχετικά μικρού ύψους (20-25mm) ώστε να απορροφήσουν οι σπόροι την απαραίτητη ποσότητα νερού για να μπορέσουν να βλαστήσουν. Στη συνέχεια κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης οι αρδεύσεις που γίνονται είναι επίσης μικρού ύψους νερού και το χρονικό διάστημα μεταξύ αυτών είναι μόλις λίγων ημερών, λόγω του μικρού βάθους του ριζικού συστήματος που του επιτρέπει στο φυτό να προσλαμβάνει το απαραίτητο για την ανάπτυξή του νερό από μικρό βάθος εδάφους κοντά στη ζώνη του ριζοστρώματος. Στα επόμενα στάδια ανάπτυξης, ανθοφορίας, σχηματισμού καρπών και ωρίμανσης το ύψος του νερού των αρδεύσεων είναι φανερά μεγαλύτερο όπως επίσης και το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των αρδεύσεων. Ο λόγος είναι το μεγάλο βάθος του ριζικού συστήματος που επιτρέπει στην καλλιέργεια να προσλαμβάνει νερό από βαθύτερα στρώματα εδάφους. Στον πίνακα 7.10.1 αναφέρεται ενδεικτικά το βάθος του ριζοστρώματος καλλιέργειας βαμβακιού στα διάφορα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Ημερομηνία	Στάδιο ανάπτυξης	Ημέρες από τη σπορά	Βάθος (cm)
18/5	Εγκατάστασης	-	-
6/6	Ανάπτυξης	30	10
5/7	Ανθοφορίας	60	30
25/7	Σχηματισμού καρπών	45	60
10/9	Ωρίμανσης	25	70

Πίνακας 7.10.1 Βάθος ριζοστρώματος βαμβακιού.

Παράρτημα Ι. Μονάδες και σύμβολα

ΠΡΟΘΕΜΑΤΑ

Οι μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό αυτήν τη μορφή ή στα πολλαπλάσια:

Tera (T)	που είναι 10^{12}
Giga (G)	10^9
Mega (M)	10^6
Kilo (k)	10^3
Hecto (h)	10^2
Deca (da)	10^1
Deci (d)	10^{-1}
Centi (c)	10^{-2}
Milli (m)	10^{-3}
Micro (μ)	10^{-6}
Nano (n)	10^{-9}
Pico (p)	10^{-12}
Femto (f)	10^{-15}
Atto (a)	10^{-18}

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Τυποποιημένη μονάδα: βαθμοί Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$)

βαθμοί Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) ($^{\circ}\text{C}$) = $(^{\circ}\text{F} - 32) \cdot 5/9$

Kelvin (K) $1\text{K} = (^{\circ}\text{C}) + 273.16$

ΠΙΕΣΗ (πίεση αέρα, πίεση ατμού)

Τυποποιημένη μονάδα: kilopascal (kPa)

millibar (mbar)	$1\text{ mbar} = 0.1\text{ kPa}$
bar	$1\text{ bar} = 100\text{ kPa}$
εκατοστόμετρο του ύδατος (cm)	$1\text{ cm of water} = 0.09807\text{ kPa}$
χιλιοστόμετρο του υδραργύρου (mmHg)	$1\text{ mmHg} = 0.1333\text{ kPa}$
ατμόσφαιρες (atm)	$1\text{ atm} = 101.325\text{ kPa}$
λίβρα ανά τετραγωνική ίντσα (psi)	$1\text{ psi} = 6.896\text{ kPa}$

TAXYTHTA ANEMOY

Τυποποιημένη μονάδα: μέτρο ανά δευτερόλεπτο (m s^{-1})

χιλιόμετρο ανά ημέρα (km day^{-1})	$1\text{ km day}^{-1} = 0.01157\text{ m s}^{-1}$
ναυτικό μίλι/ώρα (knot)	$1\text{ knot} = 0.5144\text{ m s}^{-1}$
πόδι ανά δευτερόλεπτο (ft s^{-1})	$1\text{ ft/s} = 0.3048\text{ m s}^{-1}$

ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Τυποποιημένη μονάδα: megajoule ανά τετραγωνικό μέτρο και ανά ημέρα ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) ή ως ισοδύναμη εξάτμιση στο χιλ. ανά ημέρα (mm day^{-1})

ισοδύναμη εξάτμιση (mm/day)	$1 \text{ mm day}^{-1} = 2.45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
joule ανά cm^2 ανά ημέρα ($\text{J cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	$1 \text{ J cm}^{-2} \text{ day}^{-1} = 0.01 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
θερμίδα ανά cm^2 ανά ημέρα ($\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J} = 4.1868 \cdot 10^{-8} \text{ MJ}$ $1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1} = 4.1868 \cdot 10^{-2} \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
watt ανά m^2 (W m^{-2})	$1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$ $1 \text{ W m}^{-2} = 0.0864 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$

ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

Τυποποιημένη μονάδα: χιλιοστόμετρο ανά ημέρα (mm day^{-1})

m^3 ανά εκτάριο ανά ημέρα ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$)	$1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ day}^{-1} = 0.1 \text{ mm day}^{-1}$
λίτρο ανά δευτερόλεπτο ανά εκτάριο ($1 \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)	$1 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1} = 8.640 \text{ mm day}^{-1}$
ισοδύναμη ακτινοβολία Σσε megajoules ανά τετραγωνικό μέτρο ανά ημέρα ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)	$1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1} = 0.408 \text{ mm day}^{-1}$

Παράρτημα 2. Μετεωρολογικοί πίνακες

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1. Ατμοσφαιρική πίεση (P) για τα διαφορετικά ύψη (z)

$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26}$ <div>(Eq. 7)</div>							
z (m)	P (kPa)	z (m)	P (kPa)	z (m)	P (kPa)	z (m)	P (kPa)
0	101.3	1000	90.0	2000	79.8	3000	70.5
50	100.7	1050	89.5	2050	79.3	3050	70.1
100	100.1	1100	89.0	2100	78.8	3100	69.6
150	99.5	1150	88.4	2150	78.3	3150	69.2
200	99.0	1200	87.9	2200	77.9	3200	68.8
250	98.4	1250	87.4	2250	77.4	3250	68.3
300	97.8	1300	86.8	2300	76.9	3300	67.9
350	97.2	1350	86.3	2350	76.4	3350	67.5
400	96.7	1400	85.8	2400	76.0	3400	67.1
450	96.1	1450	85.3	2450	75.5	3450	66.6
500	95.5	1500	84.8	2500	75.0	3500	66.2
550	95.0	1550	84.3	2550	74.6	3550	65.8
600	94.4	1600	83.8	2600	74.1	3600	65.4
650	93.8	1650	83.3	2650	73.7	3650	65.0
700	93.3	1700	82.8	2700	73.2	3700	64.6
750	92.7	1750	82.3	2750	72.7	3750	64.1
800	92.2	1800	81.8	2800	72.3	3800	63.7
850	91.6	1850	81.3	2850	71.8	3850	63.3
900	91.1	1900	80.8	2900	71.4	3900	62.9
950	90.6	1950	80.3	2950	71.0	3950	62.5
1000	90.0	2000	79.8	3000	70.5	4000	62.1

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.2. Ψυχομετρική σταθερά (γ)για τα διαφορετικά ύψη (z)

$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3}$							
z (m)	γ kPa/°C	z (m)	γ kPa/°C	z (m)	γ kPa/°C	z (m)	γ kPa/°C
0	0.067	1000	0.060	2000	0.053	3000	0.047
100	0.067	1100	0.059	2100	0.052	3100	0.046
200	0.066	1200	0.058	2200	0.052	3200	0.046
300	0.065	1300	0.058	2300	0.051	3300	0.045
400	0.064	1400	0.057	2400	0.051	3400	0.045
500	0.064	1500	0.056	2500	0.050	3500	0.044
600	0.063	1600	0.056	2600	0.049	3600	0.043

700	0.062	1700	0.055	2700	0.049	3700	0.043
800	0.061	1800	0.054	2800	0.048	3800	0.042
900	0.061	1900	0.054	2900	0.047	3900	0.042
1000	0.060	2000	0.053	3000	0.047	4000	0.041

Με βάση λ = 2.45 MJ kg⁻¹ at 20°C.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3. Πίεση ατμού κορεσμού (e°(T)) για τις διαφορετικές θερμοκρασίες (T)

$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right]$							
T °C	e _s kPa	T °C	e°(T) kPa	T °C	e°(T) kPa	T °C	e _s kPa
1.0	0.657	13.0	1.498	25.0	3.168	37.0	6.275
1.5	0.681	13.5	1.547	25.5	3.263	37.5	6.448
2.0	0.706	14.0	1.599	26.0	3.361	38.0	6.625
2.5	0.731	14.5	1.651	26.5	3.462	38.5	6.806
3.0	0.758	15.0	1.705	27.0	3.565	39.0	6.991
3.5	0.785	15.5	1.761	27.5	3.671	39.5	7.181
4.0	0.813	16.0	1.818	28.0	3.780	40.0	7.376
4.5	0.842	16.5	1.877	28.5	3.891	40.5	7.574
5.0	0.872	17.0	1.938	29.0	4.006	41.0	7.778
5.5	0.903	17.5	2.000	29.5	4.123	41.5	7.986
6.0	0.935	18.0	2.064	30.0	4.243	42.0	8.199
6.5	0.968	18.5	2.130	30.5	4.366	42.5	8.417
7.0	1.002	19.0	2.197	31.0	4.493	43.0	8.640
7.5	1.037	19.5	2.267	31.5	4.622	43.5	8.867
8.0	1.073	20.0	2.338	32.0	4.755	44.0	9.101
8.5	1.110	20.5	2.412	32.5	4.891	44.5	9.339
9.0	1.148	21.0	2.487	33.0	5.030	45.0	9.582
9.5	1.187	21.5	2.564	33.5	5.173	45.5	9.832
10.0	1.228	22.0	2.644	34.0	5.319	46.0	10.086
10.5	1.270	22.5	2.726	34.5	5.469	46.5	10.347
11.0	1.313	23.0	2.809	35.0	5.623	47.0	10.613
11.5	1.357	23.5	2.896	35.5	5.780	47.5	10.885
12.0	1.403	24.0	2.984	36.0	5.941	48.0	11.163
12.5	1.449	24.5	3.075	36.5	6.106	48.5	11.447

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4. Κλίση της καμπύλης πίεσης ατμού (Δ)για τις διαφορετικές θερμοκρασίες (Τ)

$$\Delta = \frac{4096 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2}$$

T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C
1.0	0.047	13.0	0.098	25.0	0.189	37.0	0.342
1.5	0.049	13.5	0.101	25.5	0.194	37.5	0.350
2.0	0.050	14.0	0.104	26.0	0.199	38.0	0.358
2.5	0.052	14.5	0.107	26.5	0.204	38.5	0.367
3.0	0.054	15.0	0.110	27.0	0.209	39.0	0.375
3.5	0.055	15.5	0.113	27.5	0.215	39.5	0.384
4.0	0.057	16.0	0.116	28.0	0.220	40.0	0.393
4.5	0.059	16.5	0.119	28.5	0.226	40.5	0.402
5.0	0.061	17.0	0.123	29.0	0.231	41.0	0.412
5.5	0.063	17.5	0.126	29.5	0.237	41.5	0.421
6.0	0.065	18.0	0.130	30.0	0.243	42.0	0.431
6.5	0.067	18.5	0.133	30.5	0.249	42.5	0.441
7.0	0.069	19.0	0.137	31.0	0.256	43.0	0.451
7.5	0.071	19.5	0.141	31.5	0.262	43.5	0.461
8.0	0.073	20.0	0.145	32.0	0.269	44.0	0.471
8.5	0.075	20.5	0.149	32.5	0.275	44.5	0.482
9.0	0.078	21.0	0.153	33.0	0.282	45.0	0.493
9.5	0.080	21.5	0.157	33.5	0.289	45.5	0.504
10.0	0.082	22.0	0.161	34.0	0.296	46.0	0.515
10.5	0.085	22.5	0.165	34.5	0.303	46.5	0.526
11.0	0.087	23.0	0.170	35.0	0.311	47.0	0.538
11.5	0.090	23.5	0.174	35.5	0.318	47.5	0.550
12.0	0.092	24.0	0.179	36.0	0.326	48.0	0.562
12.5	0.095	24.5	0.184	36.5	0.334	48.5	0.574

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5. Αριθμός της ημέρας στο έτος (J)

Ημέρα	Ιαν	Φεβρ	Μάρτ	Απρίλ	Μάι	Ιούν	Ιούλ	Αύγ*	Σεπτ	Οκτ	Νοέμ	Δεκ
1	1	32	60	91	121	152	182	213	244	274	305	335
2	2	33	61	92	122	153	183	214	245	275	306	336
3	3	34	62	93	123	154	184	215	246	276	307	337
4	4	35	63	94	124	155	185	216	247	277	308	338
5	5	36	64	95	125	156	186	217	248	278	309	339
6	6	37	65	96	126	157	187	218	249	279	310	340
7	7	38	66	97	127	158	188	219	250	280	311	341
8	8	39	67	98	128	159	189	220	251	281	312	342
9	9	40	68	99	129	160	190	221	252	282	313	343
10	10	41	69	100	130	161	191	222	253	283	314	344
11	11	42	70	101	131	162	192	223	254	284	315	345
12	12	43	71	102	132	163	193	224	255	285	316	346
13	13	44	72	103	133	164	194	225	256	286	317	347
14	14	45	73	104	134	165	195	226	257	287	318	348
15	15	46	74	105	135	166	196	227	258	288	319	349
16	16	47	75	106	136	167	197	228	259	289	320	350
17	17	48	76	107	137	168	198	229	260	290	321	351
18	18	49	77	108	138	169	199	230	261	291	322	352
19	19	50	78	109	139	170	200	231	262	292	323	353
20	20	51	79	110	140	171	201	232	263	293	324	354
21	21	52	80	111	141	172	202	233	264	294	325	355
22	22	53	81	112	142	173	203	234	265	295	326	356
23	23	54	82	113	143	174	204	235	266	296	327	357
24	24	55	83	114	144	175	205	236	267	297	328	358
25	25	56	84	115	145	176	206	237	268	298	329	359
26	26	57	85	116	146	177,	207	238	269	299	330	360
27	27	58	86	117	147	178	208	239	270	300	331	361
28	28	59	87	118	148	179	209	240	271	301	332	362
29	29	(60)	88	119	149	180	210	241	272	302	333	363
30	30	-	89	120	150	181	211	242	273	303	334	364
31	31	-	90	-	151	-	212	243	-	304	-	365

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6. Ημερήσια εξωγήινη ακτινοβολία (R_a) για τα διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη για την ημέρα 15 του μήνα.

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

(τιμές σε MJ m⁻² day⁻¹)²

Northern Hemisphere												Lat	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	deg	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.0	2.6	10.4	23.0	35.2	42.5	39.4	28.0	14.9	4.9	0.1	0.0	70	41.4	28.6	15.8	4.9	0.2	0.0	0.0	2.2	10.7	23.5	37.3	45.3
0.1	3.7	11.7	23.9	35.3	42.0	38.9	28.6	16.1	6.0	0.7	0.0	68	41.0	29.3	16.9	6.0	0.8	0.0	0.0	3.2	11.9	24.4	37.4	44.7
0.6	4.8	12.9	24.8	35.6	41.4	38.8	29.3	17.3	7.2	1.5	0.1	66	40.9	30.0	18.1	7.2	1.5	0.1	0.5	4.2	13.1	25.4	37.6	44.1
1.4	5.9	14.1	25.8	35.9	41.2	38.8	30.0	18.4	8.5	2.4	0.6	64	41.0	30.8	19.3	8.4	2.4	0.6	1.2	5.3	14.4	26.3	38.0	43.9
2.3	7.1	15.4	26.6	36.3	41.2	39.0	30.6	19.5	9.7	3.4	1.3	62	41.2	31.5	20.4	9.6	3.4	1.2	2.0	6.4	15.5	27.2	38.3	43.9
3.3	8.3	16.6	27.5	36.6	41.2	39.2	31.3	20.6	10.9	4.4	2.2	60	41.5	32.3	21.5	10.8	4.4	2.0	2.9	7.5	16.7	28.1	38.7	43.9
4.3	9.6	17.7	28.4	37.0	41.3	39.4	32.0	21.7	12.1	5.5	3.1	58	41.7	33.0	22.6	12.0	5.5	2.9	3.9	8.7	17.9	28.9	39.1	44.0
5.4	10.8	18.9	29.2	37.4	41.4	39.6	32.6	22.7	13.3	6.7	4.2	56	42.0	33.7	23.6	13.2	6.6	3.9	4.9	9.9	19.0	29.8	39.5	44.1
6.5	12.0	20.0	30.0	37.8	41.5	39.8	33.2	23.7	14.5	7.8	5.2	54	42.2	34.3	24.6	14.4	7.7	4.9	6.0	11.1	20.1	30.6	39.9	44.3
7.7	13.2	21.1	30.8	38.2	41.6	40.1	33.8	24.7	15.7	9.0	6.4	52	42.5	35.0	25.6	15.6	8.8	6.0	7.1	12.2	21.2	31.4	40.2	44.4
8.9	14.4	22.2	31.5	38.5	41.7	40.2	34.4	25.7	16.9	10.2	7.5	50	42.7	35.6	26.6	16.7	10.0	7.1	8.2	13.4	22.2	32.1	40.6	44.5
10.1	15.7	23.3	32.2	38.8	41.8	40.4	34.9	26.6	18.1	11.4	8.7	48	42.9	36.2	27.5	17.9	11.1	8.2	9.3	14.6	23.3	32.8	40.9	44.5
11.3	16.9	24.3	32.9	39.1	41.9	40.6	35.4	27.5	19.2	12.6	9.9	46	43.0	36.7	28.4	19.0	12.3	9.3	10.4	15.7	24.3	33.5	41.1	44.6
12.5	18.0	25.3	33.5	39.3	41.9	40.7	35.9	28.4	20.3	13.9	11.1	44	43.2	37.2	29.3	20.1	13.5	10.5	11.6	16.8	25.2	34.1	41.4	44.6
13.8	19.2	26.3	34.1	39.5	41.9	40.8	36.3	29.2	21.4	15.1	12.4	42	43.3	37.7	30.1	21.2	14.6	11.6	12.8	18.0	26.2	34.7	41.6	44.6
15.0	20.4	27.2	34.7	39.7	41.9	40.8	36.7	30.0	22.5	16.3	13.6	40	43.4	38.1	30.9	22.3	15.8	12.8	13.9	19.1	27.1	35.3	41.8	44.6
16.2	21.5	28.1	35.2	39.9	41.8	40.8	37.0	30.7	23.6	17.5	14.8	38	43.4	38.5	31.7	23.3	16.9	13.9	15.1	20.2	28.0	35.8	41.9	44.5
17.5	22.6	29.0	35.7	40.0	41.7	40.8	37.4	31.5	24.6	18.7	16.1	36	43.4	38.9	32.4	24.3	18.1	15.1	16.2	21.2	28.8	36.3	42.0	44.4
18.7	23.7	29.9	36.1	40.0	41.6	40.8	37.6	32.1	25.6	19.9	17.3	34	43.4	39.2	33.0	25.3	19.2	16.2	17.4	22.3	29.6	36.7	42.0	44.3
19.9	24.8	30.7	36.5	40.0	41.4	40.7	37.9	32.8	26.6	21.1	18.5	32	43.3	39.4	33.7	26.3	20.3	17.4	18.5	23.3	30.4	37.1	42.0	44.1
21.1	25.8	31.4	36.8	40.0	41.2	40.6	38.0	33.4	27.6	22.2	19.8	30	43.1	39.6	34.3	27.2	21.4	18.5	19.6	24.3	31.1	37.5	42.0	43.9
22.3	26.8	32.2	37.1	40.0	40.9	40.4	38.2	33.9	28.5	23.3	21.0	28	43.0	39.8	34.8	28.1	22.5	19.7	20.7	25.3	31.8	37.8	41.9	43.6
23.4	27.8	32.8	37.4	39.9	40.6	40.2	38.3	34.5	29.3	24.5	22.2	26	42.8	39.9	35.3	29.0	23.5	20.8	21.8	26.3	32.5	38.0	41.8	43.3
24.6	28.8	33.5	37.6	39.7	40.3	39.9	38.3	34.9	30.2	25.5	23.3	24	42.5	40.0	35.8	29.8	24.6	21.9	22.9	27.2	33.1	38.3	41.7	43.0
25.7	29.7	34.1	37.8	39.5	40.0	39.6	38.4	35.4	31.0	26.8	24.5	22	42.2	40.1	36.2	30.6	25.6	23.0	24.0	28.1	33.7	38.4	41.4	42.6
26.8	30.6	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.3	35.8	31.8	27.7	25.6	20	41.9	40.0	36.6	31.3	26.6	24.1	25.0	28.9	34.2	38.6	41.2	42.1
27.9	31.5	35.2	38.0	39.0	39.1	38.9	38.2	36.1	32.5	28.7	26.8	18	41.5	40.0	37.0	32.1	27.5	25.1	26.0	29.8	34.7	38.7	40.9	41.7
28.9	32.3	35.7	38.1	38.7	38.6	38.5	38.1	36.4	33.2	29.6	27.9	16	41.1	39.9	37.2	32.8	28.5	26.2	27.0	30.6	35.2	38.7	40.6	41.2
29.9	33.1	36.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38.0	36.7	33.9	30.6	28.9	14	40.6	39.7	37.5	33.4	29.4	27.2	27.9	31.3	35.8	38.7	40.2	40.6
30.9	33.8	36.5	38.0	38.0	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30.0	12	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0
31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37.0	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31.0	10	39.5	39.3	37.8	34.8	31.1	29.1	29.8	32.8	36.3	38.5	39.3	39.4
32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32.0	8	38.9	39.0	37.9	35.1	31.9	30.0	30.7	33.4	36.6	38.4	38.8	38.7
33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9	6	38.3	38.7	38.0	35.6	32.7	30.9	31.5	34.0	36.8	38.2	38.2	38.0
34.6	36.4	37.6	37.4	36.0	35.0	35.3	36.5	37.3	36.6	34.9	33.9	4	37.6	38.3	38.0	36.0	33.4	31.8	32.3	34.6	37.0	38.0	37.6	37.2
35.4	37.0	37.8	37.1	35.4	34.2	34.6	36.1	37.3	37.0	35.6	34.8	2	36.9	37.9	38.0	36.4	34.1	32.6	33.1	35.2	37.1	37.7	37.0	36.4
36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6	0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7. Μέση ηλιοφάνεια της ημέρας (N) για τα διαφορετικά γεωγραφικά

πλάτη για τη 15^η μέρα του μήνα
$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

Northern Hemisphere												Lat	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	deg.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.0	6.6	11.0	15.8	21.3	24.0	24.0	17.6	12.8	8.3	2.3	0.0	70	24.0	17.4	13.0	8.4	2.7	0.0	0.0	6.4	11.2	15.7	21.7	24.0
2.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24.0	22.3	17.0	12.7	8.7	4.1	0.0	69	21.9	16.7	12.9	8.7	4.3	0.0	1.7	7.0	11.3	15.3	19.9	24.0
3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22.0	20.3	18.4	12.7	9.0	5.2	1.9	68	20.1	16.2	12.8	9.1	5.3	2.0	3.7	7.6	11.3	15.0	18.8	22.1
5.0	8.2	11.2	14.7	17.9	20.3	19.2	16.0	12.6	9.3	6.0	3.7	64	19.0	15.8	12.8	9.3	6.1	3.7	4.8	8.0	11.4	14.7	18.0	20.3
5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8	62	18.3	15.5	12.7	9.6	6.7	4.8	5.6	8.3	11.4	14.5	17.4	19.2
6.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6	60	17.8	15.2	12.6	9.8	7.2	5.6	6.3	8.7	11.5	14.3	16.9	18.4
6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2	58	17.1	14.9	12.6	9.9	7.6	6.2	6.8	8.9	11.5	14.1	16.5	17.8
7.3	9.3	11.5	13.9	16.0	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7	56	16.7	14.7	12.5	10.1	8.0	6.7	7.2	9.2	11.6	13.9	16.1	17.3
7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1	54	16.3	14.5	12.5	10.2	8.3	7.2	7.6	9.4	11.6	13.8	15.8	16.9
8.0	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16.0	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5	52	16.0	14.3	12.5	10.4	8.6	7.5	8.0	9.6	11.6	13.7	15.5	16.5
8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9	50	15.7	14.2	12.4	10.5	8.8	7.9	8.3	9.7	11.7	13.6	15.3	16.1
8.6	10.0	11.6	13.4	15.0	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9.0	8.2	48	15.4	14.0	12.4	10.6	9.0	8.2	8.5	9.9	11.7	13.4	15.0	15.8
8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14.0	12.3	10.7	9.2	8.5	46	15.2	13.9	12.4	10.7	9.2	8.5	8.8	10.0	11.7	13.3	14.8	15.5
9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15.0	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7	44	14.9	13.7	12.4	10.8	9.4	8.7	9.0	10.2	11.7	13.3	14.6	15.3
9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15.0	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9.0	42	14.7	13.6	12.3	10.8	9.6	9.0	9.2	10.3	11.7	13.2	14.4	15.0
9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2	40	14.5	13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.4	10.4	11.8	13.1	14.3	14.8
9.6	10.6	11.7	13.0	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11.0	9.9	9.4	38	14.4	13.4	12.3	11.0	9.9	9.4	9.6	10.5	11.8	13.0	14.1	14.6
9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6	36	14.2	13.3	12.3	11.1	10.1	9.6	9.8	10.6	11.8	12.9	13.9	14.4
10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7	34	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3
10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9	32	13.9	13.1	12.2	11.2	10.4	9.9	10.1	10.8	11.8	12.8	13.7	14.1
10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1	30	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9
10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	13.8	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	28	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8
10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4	26	13.5	12.8	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.6	13.3	13.6
10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5	24	13.3	12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.8	13.2	13.5
10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.6	12.1	11.5	10.9	10.7	22	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.3
10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8	20	13.1	12.7	12.1	11.5	11.1	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2
11.0	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13.0	12.6	12.1	11.8	11.1	10.9	18	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1
11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1	16	12.9	12.5	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9
11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2	14	12.7	12.4	12.1	11.7	11.4	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8
11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	12	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.8	12.7
11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.8	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	10	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6
11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5	8	12.4	12.3	12.1	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5
11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	6	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3
11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	4	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2
11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	2	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1
12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.8. σT_K^4 (Stefan-Boltzmann law) στις διαφορετικές θερμοκρασίες (T)

With = $4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and $T_K = T[^\circ\text{C}] + 273.16$

T (°C)	σT_K^4 (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	σT_K^4 (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	σT_K^4 (MJ m ⁻² d ⁻¹)
1.0	27.70	17.0	34.75	33.0	43.08
1.5	27.90	17.5	34.99	33.5	43.36
2.0	28.11	18.0	35.24	34.0	43.64
2.5	28.31	18.5	35.48	34.5	43.93
3.0	28.52	19.0	35.72	35.0	44.21
3.5	28.72	19.5	35.97	35.5	44.50
4.0	28.93	20.0	36.21	36.0	44.79
4.5	29.14	20.5	36.46	36.5	45.08
5.0	29.35	21.0	36.71	37.0	45.37
5.5	29.56	21.5	36.96	37.5	45.67
6.0	29.78	22.0	37.21	38.0	45.96
6.5	29.99	22.5	37.47	38.5	46.26
7.0	30.21	23.0	37.72	39.0	46.56
7.5	30.42	23.5	37.98	39.5	46.85
8.0	30.64	24.0	38.23	40.0	47.15

8.5	30.86	24.5	38.49	40.5	47.46
9.0	31.08	25.0	38.75	41.0	47.76
9.5	31.30	25.5	39.01	41.5	48.06
10.0	31.52	26.0	39.27	42.0	48.37
10.5	31.74	26.5	39.53	42.5	48.68
11.0	31.97	27.0	39.80	43.0	48.99
11.5	32.19	27.5	40.06	43.5	49.30
12.0	32.42	28.0	40.33	44.0	49.61
12.5	32.65	28.5	40.60	44.5	49.92
13.0	32.88	29.0	40.87	45.0	50.24
13.5	33.11	29.5	41.14	45.5	50.56
14.0	33.34	30.0	41.41	46.0	50.87
14.5	33.57	30.5	41.69	46.5	51.19
15.0	33.81	31.0	41.96	47.0	51.51
15.5	34.04	31.5	42.24	47.5	51.84
16.0	34.28	32.0	42.52	48.0	52.16
16.5	34.52	32.5	42.80	48.5	52.49

BIBLIOGRAFIA

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

1. Allen, R. G. 1986. A Penman for all seasons. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 112(4): 348-368.
2. Allen, R. G. 1992. Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Report submitted to UN-FAO Water Resources Development and Management Service, Land and Water Dev. Div., Rome. 50 p.
3. Allen, R. G. 1996. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *J. Irrig. and Drain. Engrg. Div.*, ASCE 122 (2): 97-106.
4. Allen, R. G. and Brockway, C. E. 1983. Estimating consumptive use on a statewide basis pp. 79-89 in Proc. 1983 Irrig. and Drain. Specialty Conf. at Jackson, WY. ASCE, New York, NY.
5. Allen, R. G. and Pruitt, W. O. 1986. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 112(IR2): 139-155.
6. Allen, R. G. and Pruitt, W. O. 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 117(5): 758-773.
7. Allen, R. G., 1995b. Evaluation of procedures for estimating grass reference evapotranspiration using air temperature data only. Report prepared for FAO, Water Resources Development and Management Service, FAO, Rome.
8. Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L., and Burman, R. D. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.* 81: 650-662.
9. Allen, R. G., Brockway, C. E., and Wright, J. L. 1983. Weather station siting and consumptive use estimates. *J. Water Resour. Ping, and Mgmt. Div.*, ASCE 109 (2): 134-146.
10. Allen, R. G., Pruitt, W. O., Businger, J. A., Fritschen, L. J., Jensen, M. E., and Quinn, F. H. 1996. Chapter 4 "Evaporation and Transpiration" *m ASCE Handbook of Hydrology*. New York, NY. p. 125-252.
11. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998, Crop Evapotranspiration: Quidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation And Drainage Paper No 56, FAO Rome.
12. Blaney, H.F. and Criddle, W. D. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conserv. Serv. SCS-TP96. 44 pp.
13. Blaney, H.F., and W.D. Griddle, 1962. determining consumptive use and irrigation water requirements. USDA tech. Bull. 1275, 59p.
14. Blaney, H.F. and L.R. Rich, W.D. Criddle and others, 1952. Consumptive use of water. Trans. ASAE 117: 948-967.
15. Castrignanò, A., de Caro, A., and Tarantino, E. 1985. Verifica sulla validità di alcuni metodi empirici di stima dell'evapotraspirazione potenziale nel Metapontino. (Verification of validity of several empirical methods of estimating potential evapotranspiration in southern Italy). *L'Irrigazione* XXXII (4): 23-28 (in Italian).
16. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1975. *Guidelines for predicting crop water requirements*, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 p.

17. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24*, (rev.) FAO, Rome, Italy. 144 p.
18. Frevert, D. K., Hill, R. W., and Braaten, B. C. 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *J. Irrig. and Drain Engrg.*, ASCE 109(IR2): 265-270.
19. Hargreaves, G. H. 1983. Discussion of 'Application of Penman wind function' by Cuenca, R. H. and Nicholson, M. J. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 109(2): 277-278.
20. Hargreaves, G.H., 1974. Estimation of potential and crop evapotranspiration. *Trans. ASAE*. 17, 701-704.
21. Jensen, J. R. 1988. Effect of asymmetric, daily air temperature and humidity waves on calculation of reference evapotranspiration. *Proc. European Economic Community Workshop on Management of Water Resources in Cash Crops and in Alternative Production Systems*. Brussels, Belg. 24-25 Nov., 1988. 12 p.
22. Jensen, M. E. and Haise, H. R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation *J. Irrig. and Drain. Div.*, ASCE, 89:15-41.
23. Jensen, M.E., ed., 1974. Consumptive use of water and irrigation water requirements. *Rep. Tech. Comm. Irrig. Water require. Am Soc. Civ. Eng. Irrig. Div.* pp. 1-227.
24. Kotsopoulos S., and Babajimopoulos C. 1997. Analytical estimation of modified Penman equation parameters, *J. Irrig. And Drain. Engng.* Vol. 123 (4): 253-256.
25. Makkink, G. F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Engng.* 11 (3): 277-288.
26. Monteith, J. L. 1973. *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold, London.
27. Monteith, J. L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 107: 1-27.
28. Monteith, J. L. 1985. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. pp. 4-12 in *Advances in Evapotranspiration*, Proceedings of the ASAE Conference on Evapotranspiration, Chicago, Ill. ASAE, St. Joseph, Michigan.
29. Monteith, J. L. and Unsworth, M. H. 1990. *Principles of Environmental Physics*, 2nd ed., Edward Arnold, London.
30. Monteith, J. L., 1965. Evaporation and Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, Cambridge, 19: 205-234.
31. Penman, H. L. 1948. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc. Roy. Soc. London*, A193, 120-146.
32. Penman, H. L. 1963. *Vegetation and hydrology*. Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 125 pp.
33. Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weath. Rev.* 100, 81-92.
34. Pruitt, W. O. and Doorenbos, J. 1977. Background and Development of Methods to Predict Reference Crop Evapotranspiration (ET_o). Appendix II in FAO-ID-24, pp 108-119.

35. Pruitt, W. O. and Doorenbos, J. 1977. Background and Development of Methods to Predict Reference Crop Evapotranspiration (ET_o). Appendix 11 m FAO-ID-24, pp 108-119.
36. Tarantino, E., 1991. Grass reference measurements in Italy in: Allen et al. (ed), *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, ASCE, New York, p200-209.
37. Weiss, A. 1982. An experimental study of net radiation, its components and prediction *Agron. J.* 74: 871-874.
38. WMO 1970. *Guide to Hydro meteorological Practices*. WMO n° 168. TP. 82. Geneva
39. WMO 1981. *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. WMO n° 134 (second edition), Geneva.
40. Wright, J. L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *J. irrig. and Drain. Div.*, ASCE, 108 (IR2): 57-74.
41. Papazafiriou, Z.G., 1996. Crop evapotranspiration: Regional studies in Greece. *Proc. International Symposium of Applied Agrometeorology and Agroclimatology*. European Commission, COST 77,79,711, EUR 18328, p 257-286.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

1. Αλεξίου Ι., Παπαμιχαήλ Δ. 1996. Εφαρμογή των γεωστατιστικών μεθόδων στη μελέτη της χωρικής μεταβλητότητας της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΓΕΩΤΕΕ Κ. Ελλάδας «Εγγειοβελτιωτικά Έργα- Διαχείριση Υδατικών Πόρων – Εκμηχάνιση Γεωργίας», Λάρισα, 223-246.
2. Καλφούντζος Δ., 2002. Υδατοκατανάλωση καλλιεργειών. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας. Βόλος.
3. Κωτσόπουλος Σ., Μπαμπατζιμόπουλος Χ. 1995. Υπολογισμός παραμέτρων της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Πρακτικά 2^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου ΕΥΕ, Θεσσαλονίκη: 482-489.
4. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ., 2003. Αρδεύσεις. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας. Βόλος.
5. Παπαζαφειρίου, Ζ.Γ., 1990. Προσδιορισμός των φυτικών συντελεστών προσαρμοσμένων στις ελληνικές συνθήκες. Εργ. Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων του Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 117p.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074955