

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c)

Το απαιτούμενο για την ανάπτυξη των καλλιεργειών νερό εκφράζεται με τον όρο **υδατοκατανάλωση καλλιεργειών** ή **ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών**

Και αντιπροσωπεύεται από την

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c)

Είναι το νερό που καταναλώνεται από μία καλλιέργεια η οποία αναπτύσσεται

χωρίς κανένα περιορισμό σε νερό,

χωρίς προσβολές από ασθένειες και εχθρούς και

δίνει το μέγιστο της παραγωγής για τις συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο αναπτύσσεται

Εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας

Μπορεί να εκτιμηθεί με διάφορους τρόπους

A. Μέθοδος των πειραματικών τεμαχίων

(για την εκτίμηση εποχιακής εξατμισοδιαπνοής π.χ. κατά στάδιο ανάπτυξης)
και με χρήση της **εξίσωσης ισοζυγίου του εδαφικού νερού**

$$ET_c = I + P_e - RO - DP + (\theta_\alpha - \theta_\tau) \cdot RD$$

Όπου I = άρδευση (mm)

ET = εξατμισοδιαπνοή (mm)

P_e = η ωφέλιμη βροχή (mm)

RO = η απορροή (mm)

DP = η βαθιά διήθηση (mm)

RD = το ριζόστρωμα (mm)

θ_α = η εδαφική υγρασία στην αρχή της περιόδου (cm^3/cm^3)

θ_τ = η εδαφική υγρασία στο τέλος της περιόδου (cm^3/cm^3)

$$P_e = \text{Βροχή} - \left(10 + \frac{\text{Βροχή}}{8} \right)$$

για μηνιαίες βροχοπτώσεις
ή μεγαλύτερων περιόδων

Αν δεν υπάρχει RO και DP τότε η εξίσωση του ισοζυγίου του εδαφικού νερού

$$ET_c = I + P_e + (\theta_\alpha - \theta_\tau) \cdot RD$$

B. Μέθοδος διαδοχικών δειγματοληψιών (για περίοδο 3-5 ημερών)

$$ET_c = (\theta_\alpha - \theta_\tau) \cdot RD$$

Γ. Μέθοδος του λυσιμέτρου

ΕΥΡΟΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

Είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών αρδεύσεων σε ημέρες

$$I = \frac{d_n}{ET_c} \quad [\text{ημέρες}]$$

d_n είναι η καθαρή δόση άρδευσης ή το καθαρό βάθος άρδευσης (mm)

ET_c είναι η ημερήσια α εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας (mm/ημέρα)

Διάρκεια άρδευσης

Είναι ο χρόνος που απαιτείται για να εφαρμοσθεί στο χωράφι νερό ίσο με το βάθος άρδευσης

Είναι συνάρτηση της διηθητικότητας του εδάφους

Μέθοδος Thornthwaite (1948) :

$$ET = 16 \cdot N_d \cdot \left[\frac{10 \cdot T}{J} \right]^a$$

ET = δυναμική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα

N_d = λόγος της μέσης διάρκειας της ημέρας κάθε μήνα προς την ημέρα διάρκειας 12 ωρών,

T = μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε °C

J = ετήσιος δείκτης θερμότητας που υπολογίζεται από τη σχέση :

$$J = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{T_i}{5} \right]^{1.514}$$

T_i = μέση θερμοκρασία του αέρα του μήνα i σε °C

Το N_d υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$N_d = \frac{D \cdot N}{360}$$

όπου D οι ημέρες του μήνα και N η μέση διάρκεια της ημέρας το συγκεκριμένο μήνα (Πίνακας 5.1).

$$\alpha = 6.75 \cdot 10^{-7} \cdot J^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} \cdot J^2 + 17.92 \cdot 10^{-3} \cdot J + 0.49239$$

Μέθοδος Blaney - Criddle (1950): B-C

$$ET = K \cdot \frac{32 + 1.8 \cdot T}{3.94} \cdot p$$

όπου

ET η μηνιαία εξατμισοδιαπνοή (ανάγκες) της καλλιέργειας σε νερό σε mm ή $m^3/\sigma\tau\rho\acute{\epsilon}\mu\mu\alpha$,

T η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}C$,

p το ποσοστό των ωρών ημέρας κάθε μήνα προς τις ώρες ημέρας του έτους (Πίνακας 5.2) και

K ο φυτικός συντελεστής της καλλιέργειας (Πίνακας 5.3). Το K κανονικά μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν τα φυτά βρίσκονται σε πλήρη ανάπτυξη.

Πίνακας 5.2.

Ποσοστό στα εκατό των ωρών ημέρας κάθε μήνα του έτους (p) για βόρεια πλάτη από 24° έως 48°

Βόρειο πλάτος	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	
48	6.13	6.42	8.22	9.15	10.50	10.72	10.83	9.92	8.45	7.56	6.24	5.86	100
46	6.30	6.50	8.24	9.09	10.37	10.54	10.66	9.82	8.44	7.61	6.38	6.05	100
44	6.45	6.59	8.25	9.04	10.22	10.38	10.50	9.73	8.43	7.67	6.51	6.23	100
42	6.60	6.66	8.28	8.97	10.10	10.21	10.37	9.64	8.42	7.73	6.63	6.39	100
40	6.73	6.73	8.30	8.92	9.99	10.08	10.34	9.56	8.41	7.78	6.73	6.53	100
38	6.87	6.79	8.34	8.90	9.92	9.95	10.10	9.47	8.38	7.80	6.82	6.66	100
36	6.99	6.86	8.35	8.85	9.81	9.83	9.99	9.40	8.36	7.85	6.92	6.79	100
34	7.10	6.91	8.36	8.80	9.72	9.70	9.88	9.33	8.36	7.90	7.02	6.92	100
32	7.20	6.97	8.37	8.72	9.63	9.60	9.77	9.28	8.34	7.93	7.11	7.05	100
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.34	7.99	7.19	7.14	100
28	7.40	7.07	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.27	7.27	100
26	7.49	7.12	8.40	8.64	9.37	9.30	9.49	9.10	8.32	8.06	7.36	7.35	100
24	7.58	7.17	8.41	8.60	9.30	9.19	9.41	9.05	8.31	8.10	7.43	7.46	100

Πίνακας 5.3.

Εποχιακοί φυτικοί συντελεστές *K* διαφόρων καλλιεργειών

Καλλιέργεια	Βλαστική περίοδος	Φυτικός συντελεστής <i>K</i>	
		υγρό κλίμα	ξηρό κλίμα
Καλαμπόκι	4 - 5 μήνες	0.65	0.75
Σιτηρά	2 μήνες	0.60	0.70
Βαμβάκι	7 μήνες	0.60	0.70
Μηδική	μεταξύ παγετών	0.80	0.90
Χορτοδοτικά	μεταξύ παγετών	0.70	0.80
Φυλλοβόλα οπωροφόρα	μεταξύ παγετών	0.60	0.70
Εσπεριδοειδή	μεταξύ παγετών	0.45	0.55
Αμπέλια	5 - 7 μήνες	0.50	0.60
Ζαχαρότευτλα	6 μήνες	0.65	0.75
Πατάτες	3 - 5 μήνες	0.65	0.75
Ντομάτες	4 μήνες	0.65	0.70
Φασόλια	3 μήνες	0.60	0.70
Καπνός	4 μήνες	0.70	0.80
Ρύζι	3 - 5 μήνες	1.00	1.10

ΑΣΚΗΣΗ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ με B-C

Να υπολογισθεί η εξατμισοδιαπνοή για την περιοχή της Λάρισας κατά το μήνα Ιούλιο του έτους 1997 με τη μέθοδο Blaney - Criddle

Δίνονται : Οι μέσες θερμοκρασίες του αέρα (T) των 12 μηνών του 1997:

μήνας	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
T (°C)	6.0	7.7	9.4	10.9	21.7	27.1	27.8	23.9	19.9	15.0	11.3	6.7

Το ΓΠ της περιοχής, 39° βόρειο Η καλλιέργεια είναι (α) βαμβάκι, (β) καλαμπόκι

$$ET = K \cdot \frac{32+1.8 \cdot T}{3.94} \cdot p$$

Για Γ.Π. 39° βόρειο το μήνα Ιούλιο $p=10.22$ (Πίνακας 5.2) ενώ οι φυτικοί συντελεστές K για τις συγκεκριμένες περιόδους ανάπτυξης λαμβάνονται (Πίνακας 5.3) 0.70 και 0.75 για το βαμβάκι και καλαμπόκι αντίστοιχα.

Οπότε : για το βαμβάκι

$$ET = K \cdot \frac{32+1.8 \cdot T}{3.94} \cdot p = 0.70 \cdot \frac{32+1.8 \cdot 27.8}{3.94} \cdot 10.22 = 148.96 \sim 149 \text{ mm/μήνα}$$

για το καλαμπόκι

$$= 0.75 \cdot \frac{32+1.8 \cdot 27.8}{3.94} \cdot 10.22 = 159.6 \sim 160 \text{ mm/μήνα}$$

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c)

Εξαρτάται

- Από το κλίμα και
- Από την καλλιέργεια

Η επίδραση του κλίματος εκφράζεται με την

Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (ET_r)

Η επίδραση του φυτού (ή της καλλιέργειας) εκφράζεται με τον
Φυτικό συντελεστή (K_c)

Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας (ET_c)

$$ET_c = ET_r * K_c$$

Ισοδυναμεί με τη μέγιστη εξατμισοδιαπνοή ET_{max}

Το νερό που θα καταναλώσει η καλλιέργεια όταν δεν ικανοποιούνται όλες οι συνθήκες (πλήρης κάλυψη σε νερό, απουσία ασθενειών) θα είναι μικρότερη από την ET_c και αποκαλείται Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή ET_a .

$$ET_a \leq ET_c$$

Ως εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς, ET_r , θεωρείται αυτή που προέρχεται από μια υποθετική εκτεταμένη επιφάνεια υγιούς γρασιδιού, που αρδεύεται επαρκώς, έχει ομοιόμορφο ύψος 0,12 m, αναπτύσσεται δυναμικά και σκιάζει πλήρως το έδαφος.

Εξαρτάται μόνο από κλιματικούς παράγοντες

Θερμοκρασία °C, Σχετική υγρασία %, ταχύτητα ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία, και τον τόπο

Γεωγραφικό πλάτος και υψόμετρο

Προσδιορισμός της ET_r

Τροποποιημένη μέθοδος Blaney-Cridle,

Τροποποιημένη μέθοδος Penman

Συνδυασμένη μέθοδος Penman – Monteith

Φυτικός συντελεστής K_c

Οι φυτικοί συντελεστές

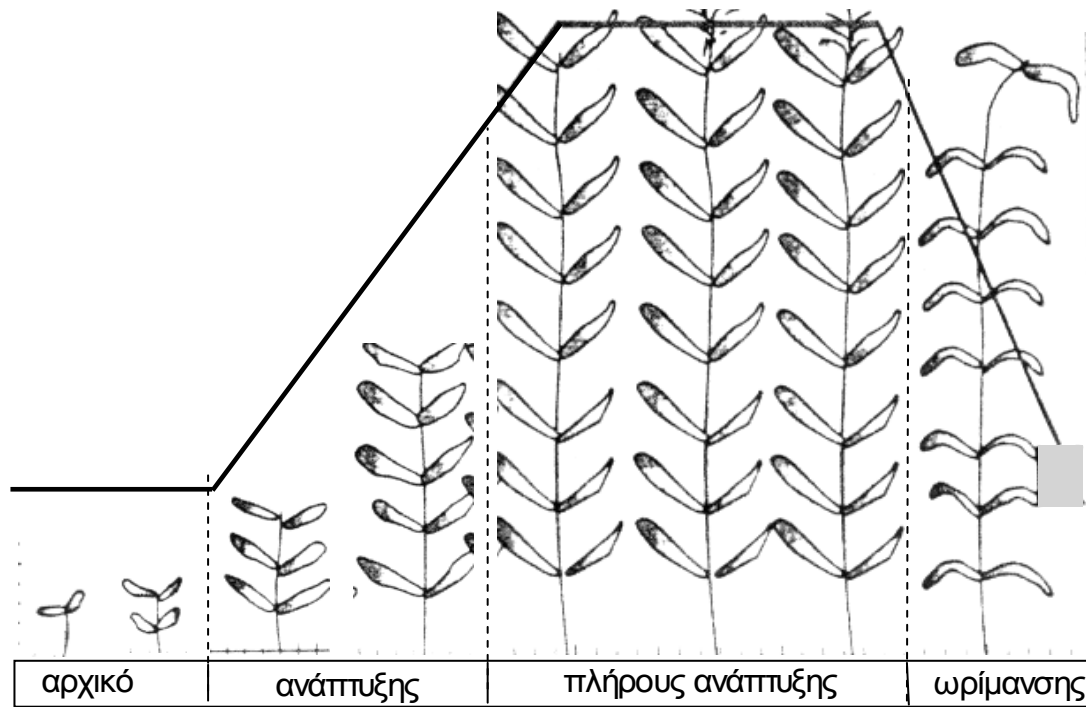
Προσδιορίζονται πειραματικά

Διαφέρουν από καλλιέργεια σε καλλιέργεια σε καλλιέργεια

Εξαρτώνται από το στάδιο ανάπτυξης του φυτού

Οι τιμές του φυτικού συντελεστή των ετήσιων καλλιεργειών δίνονται σε Πίνακες ανάλογα και με τις επικρατούσες κλιματικές συνθήκες. Ο υπολογισμός του φυτικού συντελεστή απαιτεί αρχικά τον καθορισμό των τεσσάρων σταδίων ανάπτυξης της καλλιέργειας καθώς και την ημερομηνία σποράς (Doorenbos and Pruitt 1977, Allen et al., 1998, Παπαζαφειρίου 1999). Τα στάδια ανάπτυξης των καλλιεργειών κατά τους Allen et al. (1998) είναι τα παρακάτω και η διάρκειά τους δίνεται στον Πίνακα 5.5.

Στάδια ανάπτυξης ετήσιων καλλιεργειών



Στάδιο 1 (αρχικό) (initial) : από την ημερομηνία σποράς, (μετα) φύτευσης ή έναρξη της βλαστικής (ή καλλιεργητικής) περιόδου μέχρι που η φυτοσκίαση είναι ~ 10%.

Στάδιο 2 (ανάπτυξης) (development) : από το τέλος του προηγούμενου σταδίου έως ότου η φυτοσκίαση είναι ~ 70-80%.

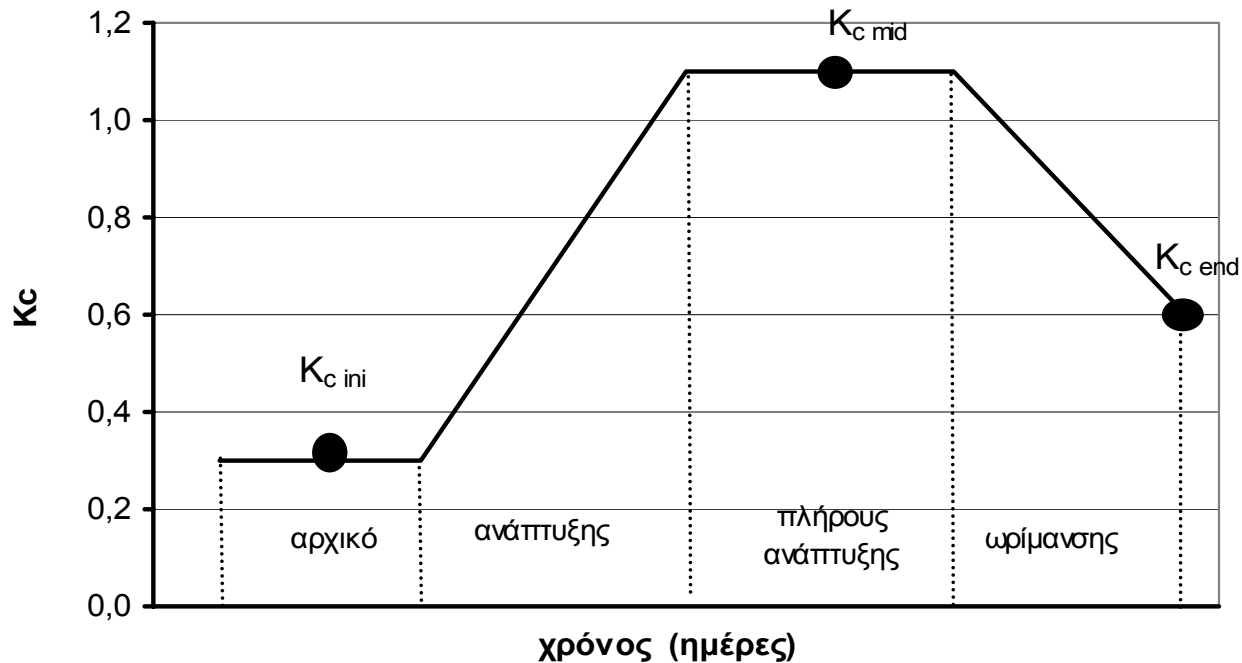
Στάδιο 3 (πλήρους ανάπτυξης) (mid season): από το τέλος του σταδίου 2 μέχρι την έναρξη της ωρίμανσης.

Στάδιο 4 (τελικό ή ωρίμανσης) (late season) : από το τέλος του σταδίου 3 μέχρι την πλήρη ωρίμανση ή συγκομιδή της καλλιέργειας.

Διάρκεια σταδίων ανάπτυξης καλλιεργειών σε ημέρες για τις Ελληνικές συνθήκες.

Καλλιέργεια	Στάδιο (1)	Στάδιο (2)	Στάδιο (3)	Στάδιο (4)	Σύνολο	Ημερομηνία σποράς *1
1. Χαμηλά Κηπευτικά						
Μπρόκολο	35	45	40	15	135	Σεπτέμβριος
Λάχανο	40	60	50	15	165	Σεπτέμβριος
Καρότα	30	40	60	20	150	Φεβ./Μάρτ.
Κουνουπίδι	35	50	40	15	140	Σεπτέμβριος
Σέλινο	25	40	45	15	125	Απρίλιος
Σκόρδα	20	35	110	45	210	Νοέμβ./ Ιαν.
Μαρούλια	20	30	15	10	75	Φεβρουάριος

Γραφική παράσταση του K_c κατά την καλλιεργητική περίοδο



Στάδιο 1 (αρχικό) (initial) : Σε όλη την διάρκεια του σταδίου η τιμή του είναι σταθερή $K_{c\ ini}$

Στάδιο 2 (ανάπτυξης) (development) : Η τιμή του μεταβάλλεται γραμμικά από $K_{c\ ini}$ μέχρι $K_{c\ mid}$

Στάδιο 3 (πλήρους ανάπτυξης) (mid season): Σε όλη την διάρκεια του σταδίου η τιμή του είναι σταθερή $K_{c\ mid}$

Στάδιο 4 (τελικό ή ωρίμανσης) (late season) : Η τιμή του μεταβάλλεται γραμμικά από $K_{c\ mid}$ μέχρι $K_{c\ end}$

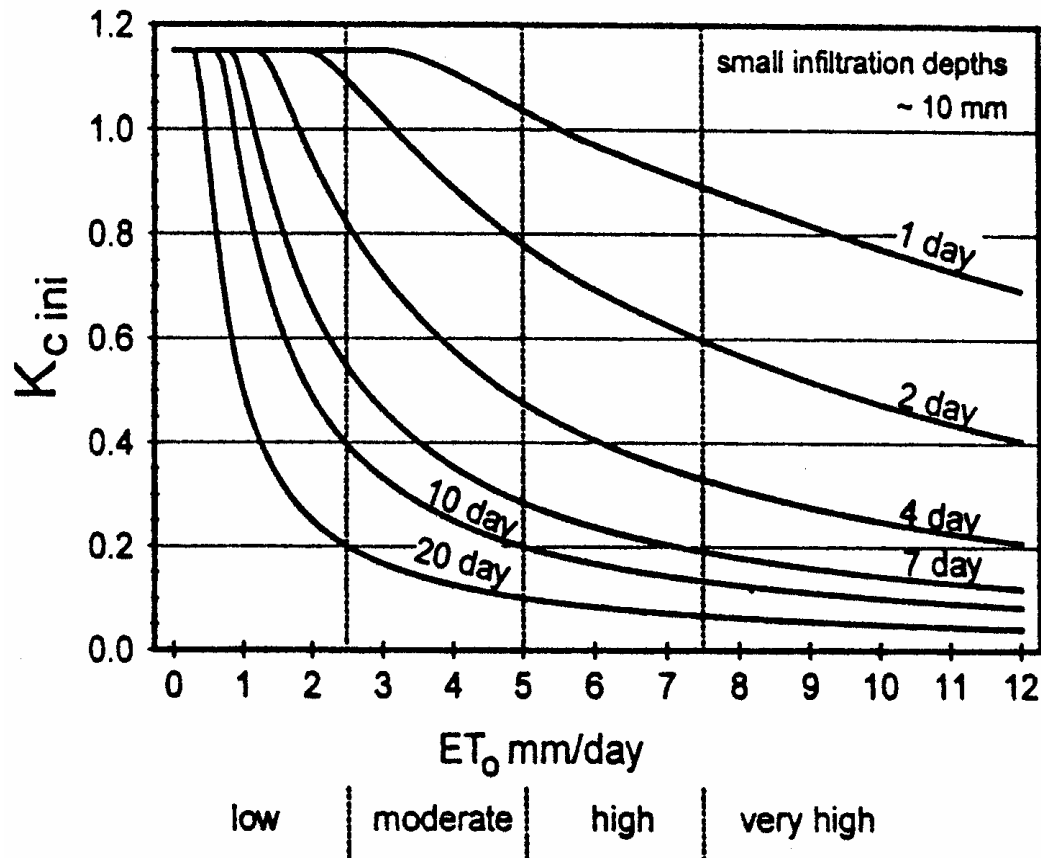
Στάδιο	Διάρκεια Σταδίου	Φυτικός συντελεστής (K_c)	
		T_i = ημέρα του βιολογικού κύκλου του φυτού	Στο μέσον των σταδίων 2 και 4
Στάδιο 1	T_1	K_{cini}	
Στάδιο 2	T_2	$K_{c(T_i)} = K_{cini} + \frac{K_{cmid} - K_{cini}}{T_2} \cdot (T_i - T_1)$	$K_{c(T_2/2)} = \frac{K_{cmid} + K_{cini}}{2}$
Στάδιο 3	T_3	K_{cmid}	
Στάδιο 4	T_4	$K_{c(T_i)} = K_{cmid} - \frac{K_{cmid} - K_{cend}}{T_4} \cdot (T_i - T_1 - T_2 - T_3)$	$K_{c(T_4/2)} = \frac{K_{cmid} + K_{cend}}{2}$
		K_{cend}	

Φυτικοί συντελεστές καλλιεργειών, K_c , σε διάφορα στάδια ανάπτυξης για την κατά FAO 56 Penman - Monteith μέθοδο.

Καλλιέργεια	$K_{c\ ini}$	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$	H_{\max} (m)
1. Χαμηλά Κηπευτικά	0.70	1.05	0.95	
Μπρόκολο		1.05	0.95	0.30
Λαχανάκι Βρυξελών		1.05	0.95	0.40
Λάχανο		1.05	0.95	0.40
Καρότα		1.05	0.95	0.30
Κουνουπίδι		1.05	0.95	0.40
Σέλινο		1.05	1.00	0.60
Σκόρδα		1.00	0.70	0.30
Μαρούλια		1.00	0.95	0.30

Φυτικός συντελεστής κατά το αρχικό στάδιο, $k_{c\ ini}$,

Για το αρχικό στάδιο (1) οπότε και η εξατμισοδιαπνοή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην εξατμισμό από το γυμνό έδαφος, ο φυτικός συντελεστής, $k_{c\ ini}$, κατά κύριο λόγο εξαρτάται από τη συχνότητα διαβροχής της επιφάνειας του εδάφους (βροχόπτωση ή άρδευση) και τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες και μπορεί να υπολογιστεί με βάση το ακόλουθο Σχήμα



Μέθοδοι υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_r .

Μέθοδοι με θεωρητικό υπόβαθρο.

Αεροδυναμικές μεθόδους

Μεθόδους ισοζυγίου ενέργειας [ακτινοβολίας]

Μεθόδους συνδυασμού (μικτές) [Penman, Penman-Monteith κτλ]

Μέθοδοι που στηρίζονται σε Εμπειρικές σχέσεις [Blaney-Criddle κτλ]

Μεθόδους εξατμισιμέτρου [εξατμισόμετρο τύπου A κτλ]

Μερικές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται

Συνδυασμένη Μέθοδος Penman-Monteith (FAO-56)

Τροποποιημένη μέθοδος Blaney-Criddle (FAO-24)

Τροποποιημένη μέθοδος ακτινοβολίας (FAO-24)

Τροποποιημένη μέθοδος Penman (FAO-24)

Μέθοδος Priestley & Taylor

Μέθοδος Hargreaves

Τροποποιημένη μέθοδος Jensen-Haise και

Τροποποιημένη μέθοδος εξατμισιμέτρου (FAO-24).

FAO 56 Penman - Monteith

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

όπου

ET_o η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (γρασίδι) σε 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 η πίεση των κορεσμένων υδρατμών (kPa),

e_a πραγματική πίεση υδρατμών (kPa),

$e_s - e_a$ το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa),

Δ η κλίση της καμπύλης των κορεσμένων υδρατμών στη θερμοκρασία T ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) και

γ ψυχομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

FAO 56 Penman - Monteith

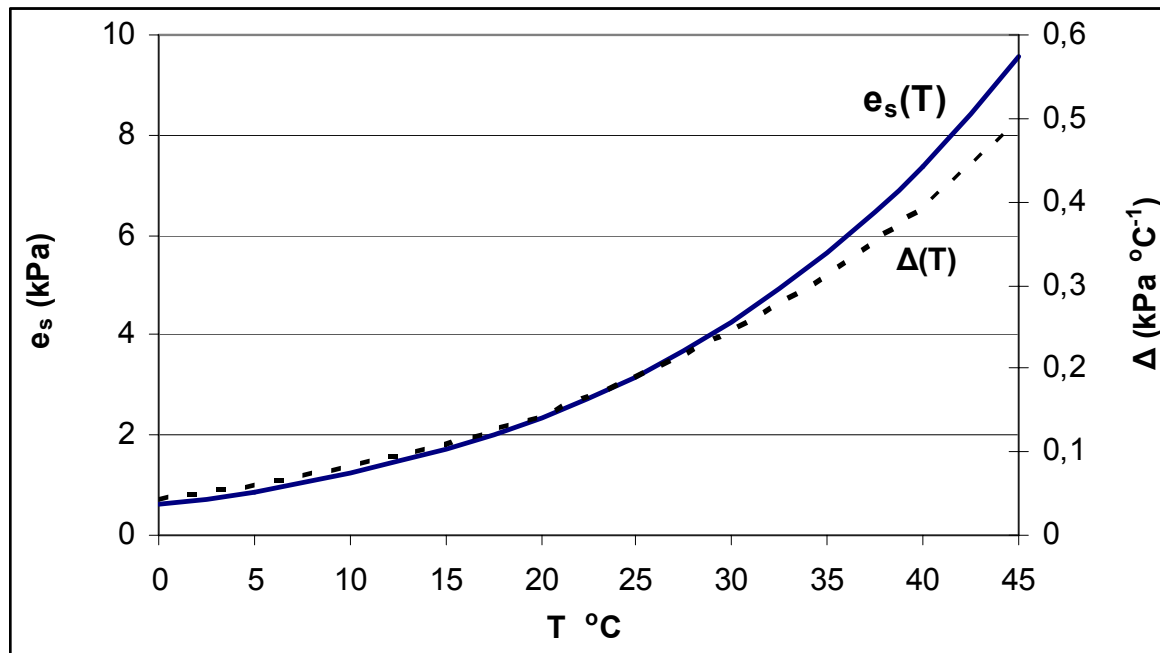
$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών ($e_s - e_a$) kPa),

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

$$e_a = e_s \frac{RH}{100}$$

$$\Delta(T) = e_s \cdot \left(\frac{4650.79}{(T + 248.57)^2} - 0.00254 \right) \quad (\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1})$$



$$e_s(T) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)}$$

$$\frac{de_s(T)}{dT} = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)} \cdot \frac{d}{dT} \left(\frac{17,27 T}{T+237,3} \right)$$

$$\frac{d}{dT} \left(\frac{17,27 T}{T+237,3} \right) = \frac{(17,27 - T)' \cdot (T+237,3) - 17,27 T \cdot (T+237,3)'}{(T+237,3)^2}$$

$$= \frac{17,27 \cdot (T+237,3) - 17,27 T \cdot (1+237,3)'}{(T+237,3)^2}$$

$$= \frac{17,27 T + 4098,17 - 17,27 T}{(T+237,3)^2} = \frac{4098,17}{(T+237,3)^2}$$

$$\Delta(T) = 0,6108 \cdot e^{\left(\frac{17,27 T}{T+237,3}\right)} \cdot \frac{4098}{(T+237,3)^2}$$

$$\Delta(T) = \frac{4098}{(T+237,3)^2} \cdot e_s$$

FAO 56 Penman - Monteith

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

ψυχομετρική σταθερά γ (kPa °C⁻¹).

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{\lambda \cdot \varepsilon} = 0.00163 \cdot \frac{P}{\lambda}$$

Όπου:

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

ε λόγος μοριακού βάρους υδρατμών προς μοριακό βάρος ξηρού αέρα, $\varepsilon = 0.622$

P ατμοσφαιρική πίεση (kPa),

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

λ λανθάνουσα θερμότητα εξατμησης (MJ kg⁻¹)

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \cdot 10^{-3}) \cdot T$$

FAO 56 Penman - Monteith

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

ταχύτητα του ανέμου u (m s^{-1})

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

όπου u_2 η μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2 m 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).

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

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 $a = 0.2$

FAO 56 Penman - Monteith

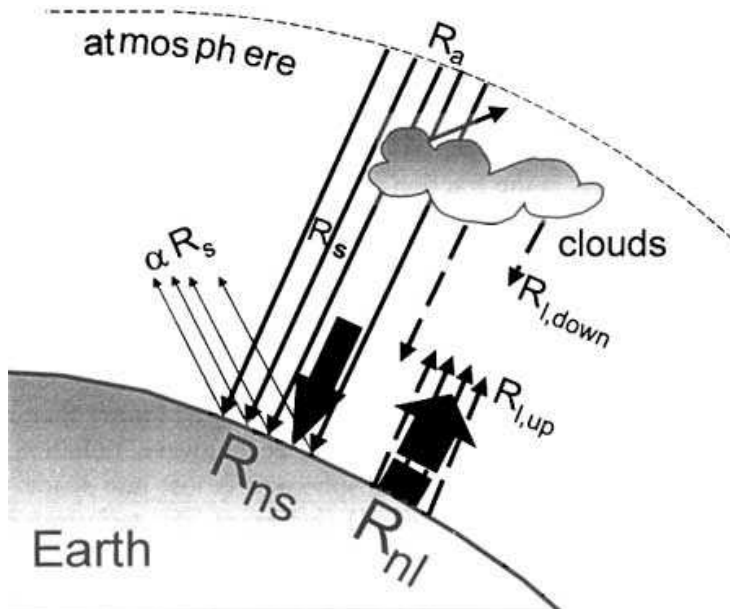
$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)}$$

Η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία, R_n

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1})$$

R_{ns} εισερχόμενη καθαρή ακτινοβολία μικρού μήκους, $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1})$

R_{nl} εξερχόμενη καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1})$



$$R_{ns} = (1 - a) \cdot R_s$$

R_s η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο φύλλωμα της καλλιέργειας

a συντελεστής ανακλαστικότητας της καλλιέργειας αναφοράς ή albedo ($a = 0.23$)

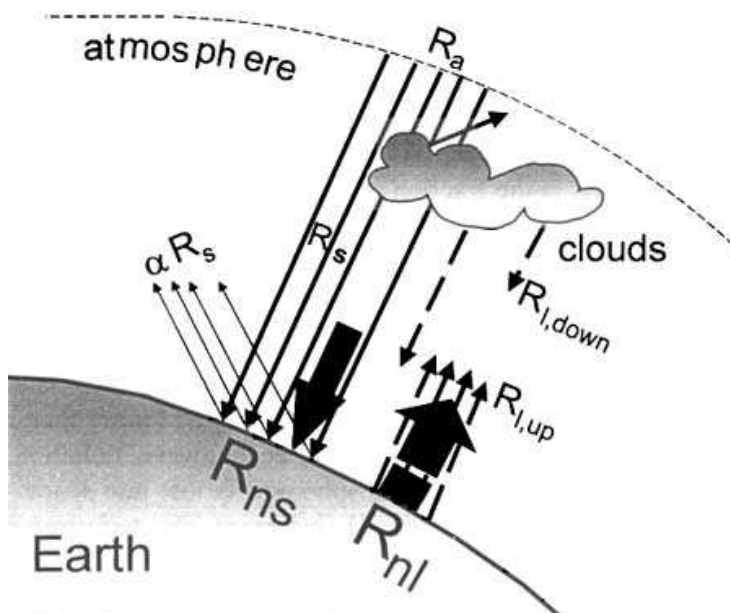
FAO 56 Penman - Monteith

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

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο φύλλωμα της καλλιέργειας R_s μπορεί να μετρηθεί με τα πυρανόμετρα. Οι μετρήσεις δίνονται σε w/m^2 ή $MJ m^{-2} day^{-1}$

Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις υπολογίζεται με τη σχέση

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



όπου

n η πραγματική (λαμπρή) ημερήσια ηλιοφάνεια σε ώρες (μετράται σε μετεωρολογικούς σταθμούς),

N η μέγιστη δυνατή (θεωρητική) ημερήσια ηλιοφάνεια σε ώρες,

n/N η σχετική ημερήσια ηλιοφάνεια,

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

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

FAO 56 Penman - Monteith

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

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

Η R_a δίνεται σε πίνακες (Πίνακας 5.1) ή μπορεί να υπολογιστεί

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

Επίσης και η N δίνεται σε πίνακες (Πίνακας 5.2) ή μπορεί να υπολογιστεί

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

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.

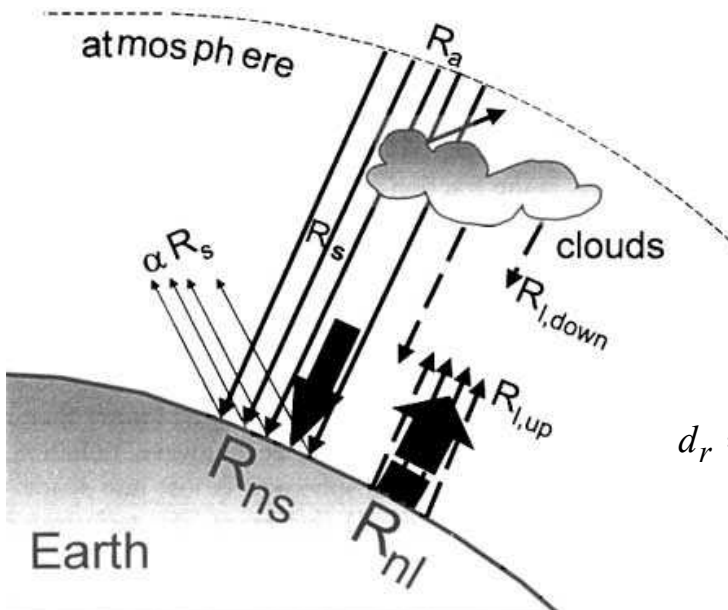
Τα d_r , δ , και ω_s υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις :

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

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

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

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



Πίνακας 5.1:

Μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία (R_a) στο άνω όριο της ατμόσφαιρας R_a σε $M J m^2 d^{-1}$

Βόρειο πλάτος	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ
50	9,3	14,9	23,0	31,1	38,7	41,9	40,2	34,5	26,7	18,1	11,0	7,8
48	10,5	16,2	24,0	31,9	39,0	42,1	40,4	35,0	27,4	19,1	12,3	9,1
46	12,0	17,4	25,0	32,6	39,2	42,1	40,7	35,5	28,2	20,3	13,5	10,5
44	13,0	18,6	26,0	33,6	39,4	42,1	40,7	36,0	29,2	21,3	14,7	11,5
42	14,0	19,8	27,0	34,3	39,7	42,4	40,9	36,8	29,9	22,3	15,9	12,7
40	15,7	21,1	27,9	35,0	40,2	42,4	40,9	37,2	30,6	23,5	17,2	14,0
38	16,9	22,1	28,9	35,5	40,2	42,1	40,9	37,5	31,4	24,5	18,4	14,9
36	18,1	23,0	29,6	36,0	40,2	42,1	40,9	37,7	32,1	26,0	19,6	16,2
34	19,4	24,0	30,4	36,3	40,4	41,9	41,2	38,0	32,8	26,5	20,8	17,6
32	20,3	25,0	31,4	36,8	40,4	41,7	41,2	38,2	33,3	27,4	22,1	19,1
30	21,6	26,2	32,1	37,2	40,4	41,7	41,2	38,5	34,1	28,4	23,3	20,3
28	22,8	27,2	32,8	37,5	40,4	41,2	40,9	38,5	34,5	29,4	24,3	21,6
26	24,0	28,2	33,6	37,5	40,2	40,9	40,7	38,5	35,0	30,1	25,2	22,8
24	25,0	29,2	34,1	37,7	40,2	40,7	40,4	38,7	35,5	30,9	26,2	23,8
22	26,2	30,1	34,8	38,0	39,9	40,2	40,2	38,7	35,8	31,9	27,2	25,0
20	27,4	31,1	35,3	38,2	39,9	40,2	39,9	39,0	36,3	32,6	28,4	26,2

FAO 56 Penman - Monteith

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

Η εξερχόμενη καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους, R_{nl} , ($M J m^{-2} day^{-1}$) υπολογίζεται

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

όπου:

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

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

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

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

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

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

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

FAO 56 Penman - Monteith

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

Ροή θερμότητας προς το έδαφος G

$$G = c_p \frac{T_i + T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z$$

G= Ροή θερμότητας προς το έδαφος $MJ m^{-2} day^{-1}$

C_p =θερμοχωρητικότητα του εδάφους $MJ m^{-3} ^\circ C^{-1}$

T_i =θερμοκρασία αέρα στο χρόνο i $^\circ C$

T_{i-1} =θερμοκρασία αέρα στο χρόνο i-1 $^\circ C$

Δt =χρονικό διάστημα μεταξύ του χρόνου i και i-1

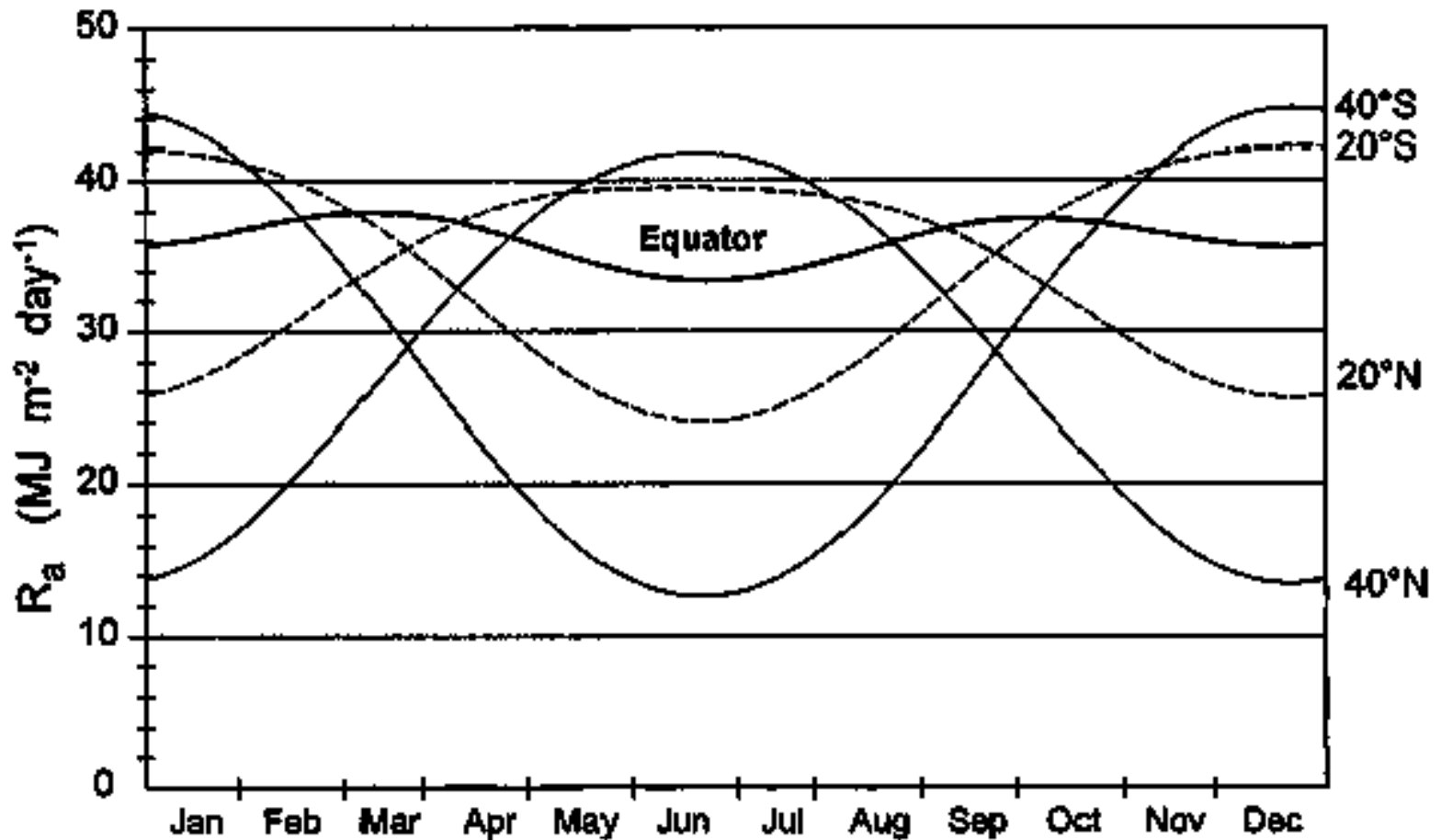
Δz =Επηρεαζόμενο βάθος εδάφους 0,1-0,2 m για διάστημα μιας ή λίγων ημερών. $\Delta z=2$ m ή περισσότερο για διάστημα μήνα

Για ημερήσιους υπολογισμούς $G_{day} \approx 0$

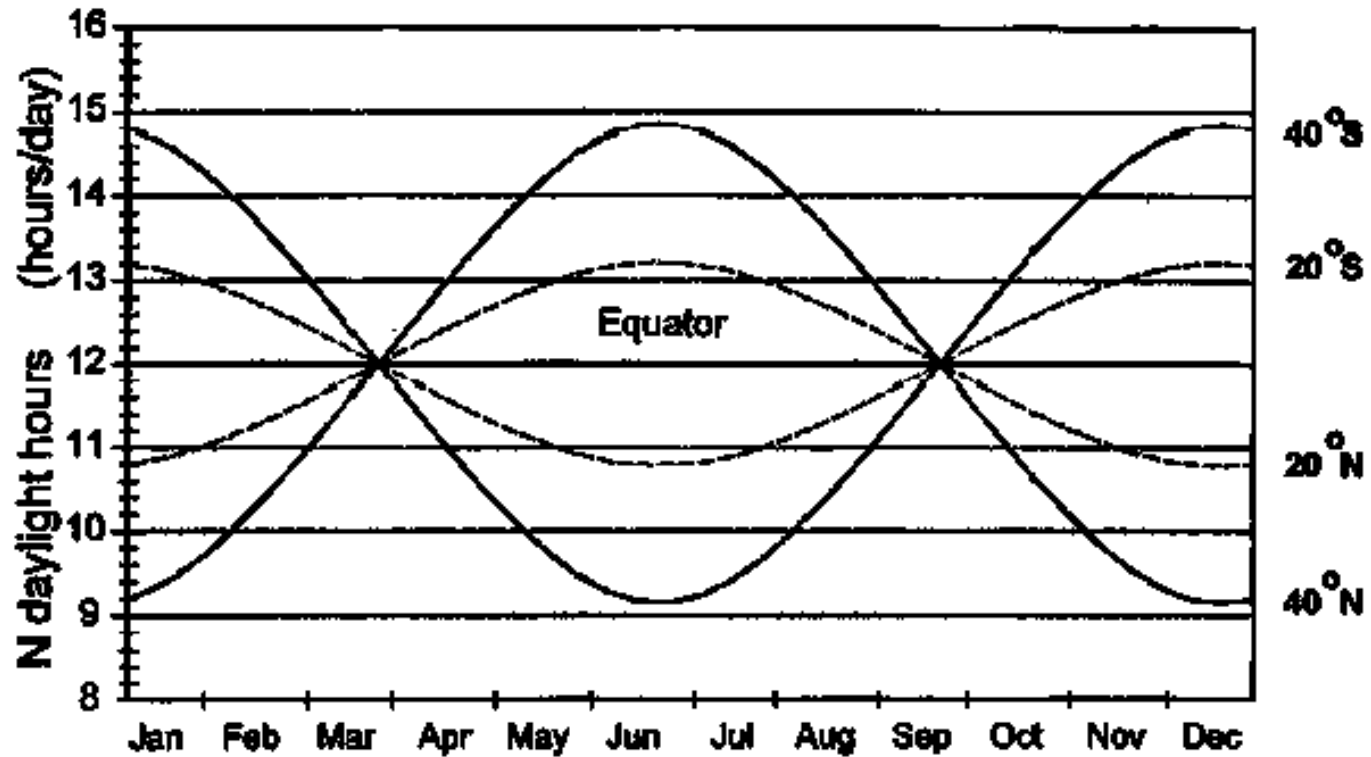
Για ωριαίους υπολογισμούς $G_{hr} = 0,1 R_n$ (κατά την ημέρα και έχει θετική τιμή)

$G_{hr} = 0,5 R_n$ (κατά την νύχτα)

Ετήσια μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στο άνω όριο της ατμόσφαιρας (R_a) στον ισημερινό, στις 20° και 40° Βόρειο και Νότιο Γ.Π.



Ετήσια μεταβολή της θεωρητικής ηλιοφάνειας (N) σε ώρες/ημέρα στον ισημερινό, στις 20° και 40° Βόρειο και Νότιο Γ.Π.



Πίνακας μετατροπής μονάδων

	multiplier to obtain energy received on a unit surface per unit time				equivalent evaporation
	MJ m ⁻² day ⁻¹	J cm ⁻² day ⁻¹	cal cm ⁻² day ⁻¹	W m ⁻²	mm day ⁻¹
1 MJ m⁻² day⁻¹	1	100	23.9	11.6	0.408
1 cal cm⁻² day⁻¹	4.1868 10 ⁻²	4.1868	1	0.485	0.0171
1 W m⁻²	0.0864	8,64	2.06	1	0.035
1 mm day⁻¹	2.45	245	58.5	28.4	1

Τροποποιημένη μέθοδος Blaney-Criddle (FAO-24)

$$ET_o = a + b \cdot p \cdot (0.46 \cdot T + 8.16)$$

όπου:

ET_o =εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (γρασίδι) σε mm/d

T =μέση ημερήσια θερμοκρασία σε °C

P =ημερήσιο ποσοστό των ετήσιων ωρών ηλιοφάνειας (%)

a, b =συντελεστές προσαρμογής που εξαρτώνται από την υγρασία του αέρα, τις ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας και την ταχύτητα του ανέμου

$$a = 0.0043 \cdot RH_{\min} - n/N - 1.41$$

όπου:

RH_{\min} =ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα (%)

n, N =ώρες πραγματικής και μέγιστης ημερήσιας ηλιοφάνειας (ώρες)

Τροποποιημένη μέθοδος Blaney-Criddle (FAO-24)

$$ET_o = a + b \cdot p \cdot (0.46 \cdot T + 8.16)$$

$$b = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot RH_{min} + \alpha_2 \frac{n}{N} + \alpha_3 \cdot U_2 + \alpha_4 \cdot RH_{min} \cdot \frac{n}{N} + \alpha_5 \cdot RH_{min} \cdot U_2$$

$$\alpha_0 = 0,81917, \quad \alpha_1 = -0,0040922, \quad \alpha_2 = 1,0705$$

$$\alpha_3 = 0,065649 \quad \alpha_4 = -0.0059684 \quad \alpha_5 = -0.0005967$$

$$U_2 = U_z \left(\frac{2}{z} \right)^{0,2}$$

Πίνακας 5.4

Τιμές του συντελεστή b που χρησιμοποιούνται στην τροποποιημένη μέθοδο Blaney-Criddle

n/N	RHmin, %						Ταχύτητα ανέμου, $m \cdot s^{-1}$
	0	20	40	60	80	100	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
0,0	0,84	0,80	0,74	0,64	0,52	0,38	$U_2 = 0$
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	
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	$U_2 = 2$
0,2	1,19	1,08	0,96	0,84	0,66	0,50	
0,4	1,41	1,26	1,11	0,97	0,77	0,60	
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	$U_2 = 4$
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	
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	$U_2 = 6$
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	
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	

Τροποποιημένη μέθοδος εξατμισιμέτρου (FAO-24).



Εξατμισίμετρο τύπου A με μικρόμετρο για τη μέτρηση της εξάτμισης

$$ET_r = k_{pan} \cdot E_{pan}$$

όπου:

ET_o =εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (γρασίδι) σε mm/d

ET_{pan} =εξάτμιση από εξατμισίμετρο σε mm/d

k_{pan} =αδιάστατος συντελεστής εξατμισιμέτρου

$$ET_r = k_{pan} \cdot E_{pan}$$

Ο συντελεστής k_{pan} περιλαμβάνει την επίδραση διαφόρων παραγόντων που διαφοροποιούν την εξάτμιση από εξατμισίμετρο και από μια φυτοκαλυμμένη επιφάνεια όπως:

Η διαφορά στην ανακλαστικότητα φυτοκαλυμμένης και υδάτινης επιφάνειας

Η μεταφορά θερμότητας μέσω των τοιχωμάτων του εξατμισιμέτρου

Το χρώμα του εξατμισιμέτρου

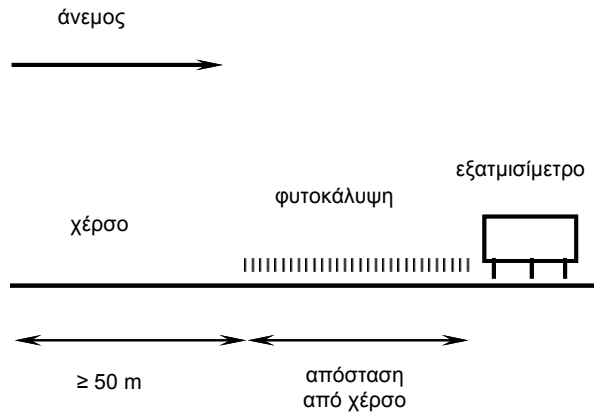
Η θέση του εξατμισιμέτρου και οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες

Το γεγονός ότι η εξάτμιση από εξατμισίμετρο συμβαίνει ημέρα και νύχτα ενώ η διαπνοή των φυτοκαλυμμένων επιφανειών γίνεται την ημέρα.

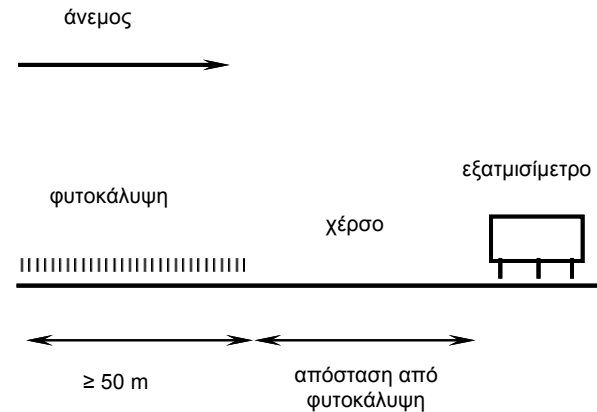
Τροποποιημένη μέθοδος εξατμισιμέτρου (FAO-24).

Ο συντελεστής *k_{pan}* συνήθως λαμβάνεται από πίνακες (Doorenbos & Pruitt 1977) όπου λαμβάνεται υπόψη και η θέση του εξατμισιμέτρου όπως φαίνεται στο Σχήμα (περίπτωση A και B).

περίπτωση A



περίπτωση B



Περίπτώσεις τοποθέτησης εξατμισιμέτρου

TABLE 5

Pan coefficients (K_p) for Class A pan for different pan siting and environment and different levels of mean relative humidity and wind speed (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24)

Class A pan	Case A: Pan placed in short green cropped area				Case B: Pan placed in dry fallow area			
	RH mean (%) →	low < 40	medium 40 -70	high > 70		low < 40	medium 40 -70	high > 70
Wind speed ($m s^{-1}$)	Windward side distance of green crop (m)				Windward side distance of dry fallow (m)			
Light	1	.55	.65	.75	1	.7	.8	.85
< 2	10	.65	.75	.85	10	.6	.7	.8
	100	.7	.8	.85	100	.55	.65	.75
	1 000	.75	.85	.85	1 000	.5	.6	.7
Moderate	1	.5	.6	.65	1	.65	.75	.8
2-5	10	.6	.7	.75	10	.55	.65	.7
	100	.65	.75	.8	100	.5	.6	.65
	1 000	.7	.8	.8	1 000	.45	.55	.6
Strong	1	.45	.5	.6	1	.6	.65	.7
5-8	10	.55	.6	.65	10	.5	.55	.65
	100	.6	.65	.7	100	.45	.5	.6
	1 000	.65	.7	.75	1 000	.4	.45	.55
Very strong	1	.4	.45	.5	1	.5	.6	.65
> 8	10	.45	.55	.6	10	.45	.5	.55
	100	.5	.6	.65	100	.4	.45	.5
	1 000	.55	.6	.65	1 000	.35	.4	.45

ΑΣΚΗΣΗ ΥΔΑΤΟΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ

Τα στάδια ανάπτυξης μιας καλλιέργειας έχουν διάρκεια: Αρχικό 35 ημέρες, ανάπτυξης 42 ημέρες, πλήρους ανάπτυξης 43 ημέρες και της ωρίμανσης 23 ημέρες. Οι τιμές των φυτικών συντελεστών είναι $K_{c\ ini}=0,35$, $K_{c\ mid}=1,10$ και $K_{c\ end}=0,45$. Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_r) που υπολογίστηκε με τη μέθοδο Penman – Monteith από τις κλιματικές παραμέτρους της Θερμοκρασία $^{\circ}C$, της Σχετικής υγρασίας %, της ταχύτητας του ανέμου και της ηλιακής ακτινοβολίας, κατά στάδιο έχει μέση τιμή: Αρχικό 2,3 mm/ημέρα, ανάπτυξης 5,4 mm/ημέρα, πλήρους ανάπτυξης 6,4 mm/ημέρα και της ωρίμανσης 3,1 mm/ημέρα. Πια είναι η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ή η υδατοκατανάλωση της (ET_c) κατά στάδιο ανάπτυξης και συνολικά για την καλλιεργητική περίοδο. [Για τα στάδια της ανάπτυξης και της ωρίμανσης να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή των φυτικών συντελεστών στην αρχή και στο τέλος του σταδίου].

