

# ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΠΝΟΗ

ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ



# Γενικά

**Εξάτμιση:** Συνδετικός κρίκος μεταξύ υδατικού και ενεργειακού ισοζυγίου

**Εξατμισοδιαπνοή:** βασικής σημασίας για τη μελέτη και λειτουργία υδραυλικών έργων

Χρήση υδατικού ισοζυγίου για την εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής, αφού έχουν εκτιμηθεί οι υπόλοιπες συνιστώσες

**Σε αυτό το μάθημα:**

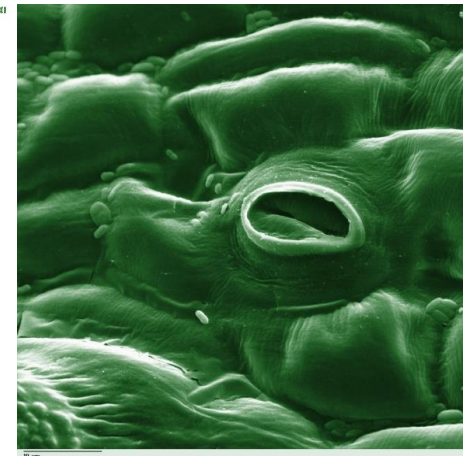
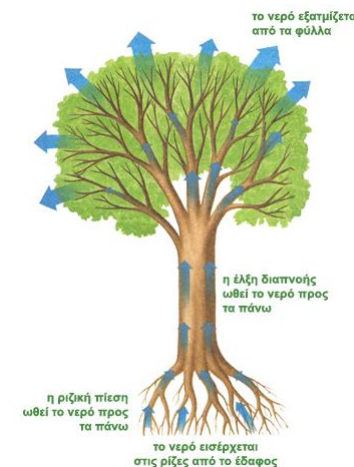
- Εξάτμιση
- Διαπνοή
- Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή
- Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή
- Μέθοδοι Εκτίμησης εξάτμισης από υδάτινες επιφάνειες
- Μέθοδοι Εκτίμησης δυνητικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής από εδαφικές επιφάνειες

# Ορισμοί

- **Εξάτμιση:** τα μόρια ενός σώματος (ωκεανοί, λίμνες, ποτάμια, έλη, έδαφος, υγρές καλλιέργειες) μεταπίπτουν από την υγρή ή τη στερεά φάση, στην αέρια.
- **Διαπνοή:** διαδικασία με την οποία τα φυτά χρησιμοποιούν το νερό για το μεταβολισμό και την ανάπτυξή τους. Τα φυτά ελέγχουν την ποσότητα νερού που διαπνέεται ανοίγοντας και κλείνοντας τα στόματα του φυλλώματος.
- **Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration – ET):** η συνολική διεργασία μεταφοράς νερού στην ατμόσφαιρα από φυτοκαλυμμένες επιφάνειες. Ο όρος χρησιμοποιείται γιατί οι η εξάτμιση και η διαπνοή είναι δύσκολο να διαχωριστούν.
- **Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή (potential evapotranspiration – PET) :** η ποσότητα ET που πραγματοποιείται σε πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες με χλωρίδα επιφάνειες, κάτω από απεριόριστη διαθεσιμότητα νερού.



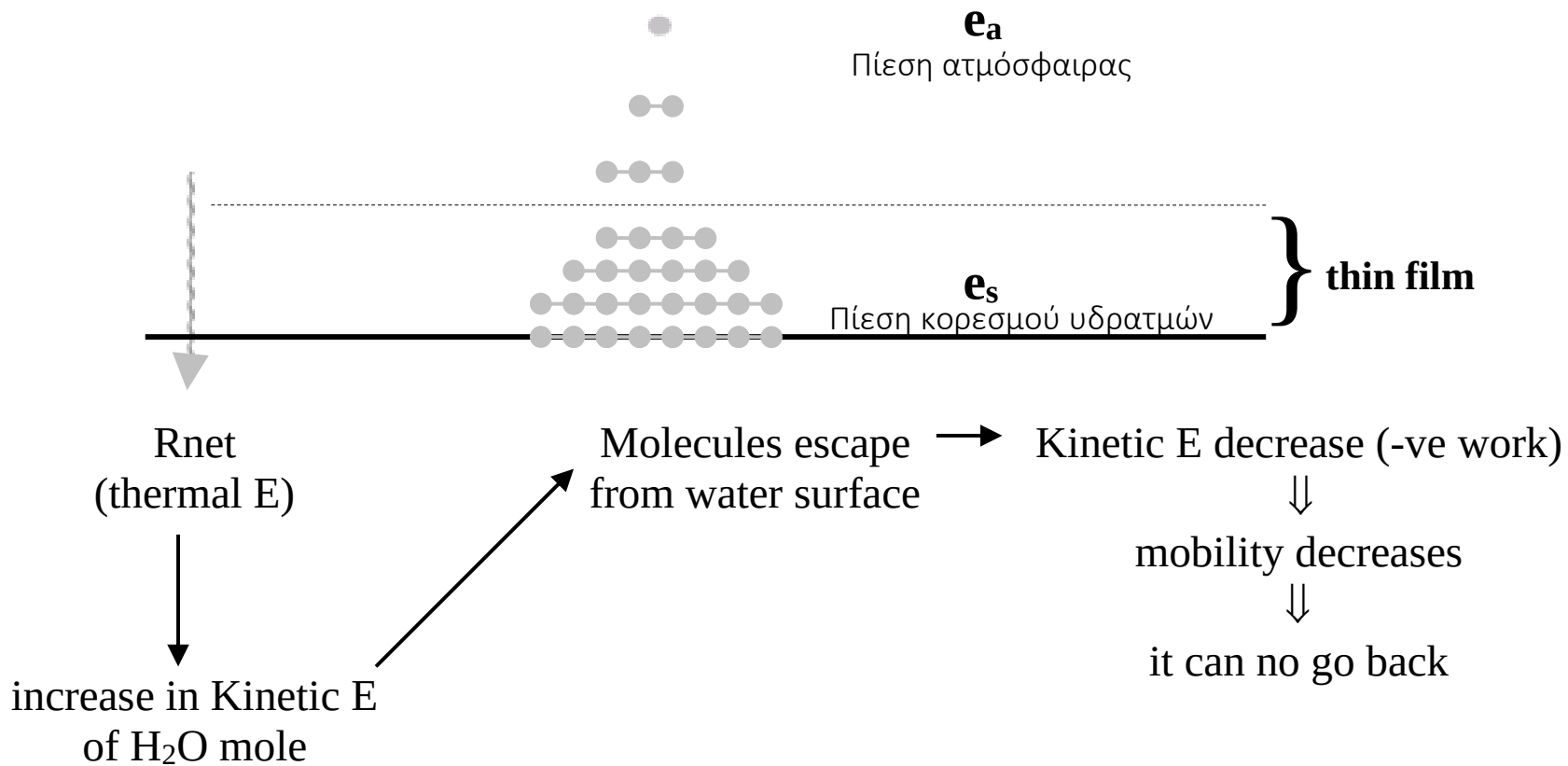
Εξάτμιση από λίμνη και καλλιέργεια



Διαδικασία διαπνοής σε και λεπτομέρεια στομάτων διαπνοής

# Εισαγωγή

Πιθανή εξατμισοδιαπνοή (ET): απεριόριστη πηγή  $H_2O \neq$  Πραγματικής ET



Δημιουργία κλίσης ατμών  
(νόμος διάχυσης του Fick):

$$E = -M \cdot \frac{de}{dz}$$

όπου  $M$  συντελεστής μεταφοράς

# Παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση

## Ηλιακή Ακτινοβολία

Για την μετατροπή του νερού σε υδρατμούς απαιτείται η ηλιακή ενέργεια. Τα σύννεφα εμποδίζουν το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας να φτάσει ολόκληρο στη γη → επιβράδυνση εξάτμισης.

## Άνεμος-Ταχύτητα ανέμου

Το οριακό στρώμα ανάμεσα στο έδαφος και στον αέρα γίνεται κορεσμένο κατά τη διαδικασία εξάτμισης του νερού. Για να συνεχιστεί η διαδικασία αυτή πρέπει το στρώμα αυτό να μετακινηθεί και να αντικατασταθεί από ξηρότερο αέρα. Η μετακίνηση του στρώματος εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου.

## Σχετική Υγρασία

Όσο αυξάνεται η υγρασία του αέρα μειώνεται η ικανότητά του να απορροφά και άλλους υδρατμούς → μείωση τιμής εξάτμισης.

## Θερμοκρασία

Όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία περιβάλλοντος και αέρα τόσο γρηγορότερη η εξάτμιση. Επίσης η ικανότητα του αέρα να απορροφά υδρατμούς αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας.

# Φυσικές ιδιότητες νερού και υδρατμών

Μερική πίεση μάζας υδρατμών στην ατμόσφαιρα (νόμος Dalton):  $e \cdot V = n \cdot R \cdot T$

όπου  $e$  η μερική πίεση υδρατμών

$V$  ο όγκος που καταλαμβάνουν σε θερμοκρασία  $T(^{\circ}K)$

$n$  η μάζα των υδρατμών προς τη μάζα 1 γραμμομορίου υδρατμών (18 g)

$R$  παγκόσμια σταθερά των αερίων με τιμή  $R = 8.31 \frac{Nm}{^{\circ}K Mole} = 8.31 \frac{J}{^{\circ}K Mole} = 0.0821 \frac{lt atm}{^{\circ}K Mole}$

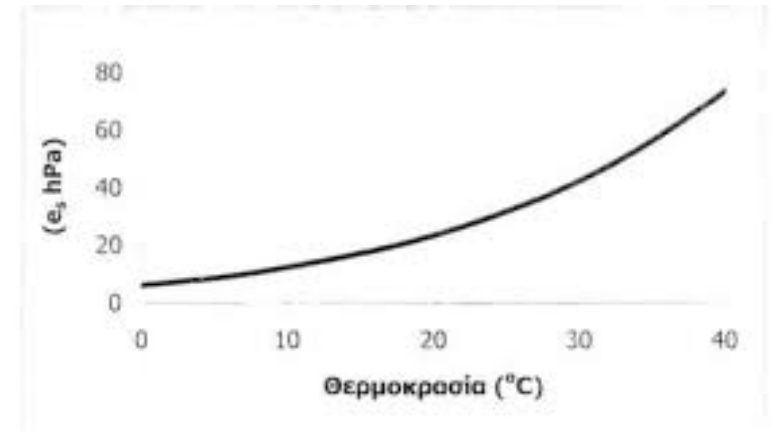
Πίεση κορεσμού υδρατμών: τιμή πίεσης πάνω από την οποία οι υδρατμοί αρχίζουν να υγροποιούνται

$$e_s = 6.11 \exp\left(\frac{17.27+T}{237.3+T}\right) [hPa] \quad (T \text{ σε } ^{\circ}C)$$



Παραγωγή

$$\text{Κλίση καμπύλης κορεσμού: } \Delta = \frac{de_s}{dT} = \frac{4098e_s}{(T+237.3)^2} [hPa/^{\circ}C]$$



Καμπύλη κορεσμού υδρατμών

# Φυσικές ιδιότητες νερού και υδρατμών

Σχετική Υγρασία (Relative Humidity):  $U = \frac{e}{e_s} \cdot 100\%$

Έλλειμα κορεσμού:  $D = e_s - e$  [hPa]

Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης: η ενέργεια που πρέπει να δοθεί στα μόρια νερού ώστε να περάσουν από την υγρή στην αέρια φάση  $\lambda = 2501 - 2.361T_s$  [kJ/kg]

Ψυχομετρικός συντελεστής  $\gamma$ , υπεισέρχεται στον υπολογισμό της εξάτμισης:  $\gamma = \frac{c_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} = 1.63 \frac{P}{\lambda}$  [hPa/°C]

όπου  $c_p$  ειδική θερμότητα του αέρα (συνήθως 1.013 kJ/kg°C)

$P$  η ατμοσφαιρική πίεση [hPa]

$\varepsilon = 0.622$  ο λόγος μοριακών βάρων νερού και ξηρού αέρα  $\rightarrow 18 \text{ g} / 28.98 \text{ g} = 0.622$

$\lambda$  η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης [kJ/kg]

συνήθως  $\gamma = 0.67$  hPa/°C

# Ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας $S_0$

Λαμβάνεται από πίνακες ως συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους του τόπου που εξετάζεται και του συγκεκριμένου μήνα

Μέσες μηνιαίες τιμές της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας  $S_0$  σε  $\text{kJ}/(\text{m}^2\text{d})$  για γεωγραφικά πλάτη ( $\phi$ )  $36^\circ - 46^\circ$  στο Βόρειο Ημισφαίριο

|       | Γεωγραφικό πλάτος $\phi$ ( $^\circ$ ) |       |       |       |       |       |
|-------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Μήνας | 36                                    | 38    | 40    | 42    | 44    | 46    |
| Ιαν   | 17604                                 | 16383 | 15156 | 13926 | 12696 | 11470 |
| Φεβ   | 22349                                 | 21230 | 20092 | 18935 | 17762 | 16575 |
| Μαρ   | 28967                                 | 28100 | 27198 | 26265 | 25300 | 24305 |
| Απρ   | 35447                                 | 34964 | 34441 | 33878 | 33278 | 32641 |
| Μαϊ   | 39820                                 | 39711 | 39564 | 39380 | 39161 | 38908 |
| Ιουν  | 41571                                 | 41658 | 41711 | 41730 | 41718 | 41677 |
| Ιουλ  | 40725                                 | 40731 | 40701 | 40637 | 40539 | 40410 |
| Αυγ   | 37255                                 | 36942 | 36590 | 36199 | 35771 | 35306 |
| Σεπ   | 31510                                 | 30800 | 30053 | 29271 | 28453 | 27601 |
| Οκτ   | 24651                                 | 23624 | 22571 | 21494 | 20395 | 19274 |
| Νοε   | 18879                                 | 17689 | 16488 | 15279 | 14065 | 12849 |
| Δεκ   | 16230                                 | 14993 | 13755 | 12519 | 11289 | 10069 |

# Ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος = $f_s * S_0$

$f_s$ : αδιάστατος συντελεστής απορρόφησης από την ατμόσφαιρα που κατά Prescott

$$f_s = \alpha_s + b_s \frac{n}{N}$$

τυπικές τιμές των παραμέτρων  $\alpha_s = 0.25$  και  $b_s = 0.50$

$n$  ο πραγματικός αριθμός ωρών ηλιοφάνειας της ημέρας

$N$  ο θεωρητικός αριθμός ωρών της ημέρας

(ώρες από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου).

Λαμβάνεται από πίνακες συναρτήσεων του

γεωγραφικού πλάτους της περιοχής

και του μήνα που εξετάζεται

*Μέσες μηνιαίες τιμές της  
αστρονομικής διάρκειας  
ημέρας  $N$  σε ώρες  
για γεωγραφικά πλάτη  
( $\phi$ )  $36^\circ - 46^\circ$  στο Βόρειο  
Ημισφαίριο*

| Μήνας | Γεωγραφικό πλάτος $\phi$ (°) |      |      |      |      |      |
|-------|------------------------------|------|------|------|------|------|
|       | 36                           | 38   | 40   | 42   | 44   | 46   |
| Ιαν   | 9.8                          | 9.7  | 9.5  | 9.3  | 9.1  | 8.9  |
| Φεβ   | 10.6                         | 10.5 | 10.4 | 10.3 | 10.2 | 10.1 |
| Μαρ   | 11.7                         | 11.7 | 11.7 | 11.7 | 11.6 | 11.6 |
| Απρ   | 12.9                         | 13.0 | 13.0 | 13.1 | 13.2 | 13.3 |
| Μαϊ   | 13.9                         | 14.0 | 14.2 | 14.4 | 14.5 | 14.7 |
| Ιουν  | 14.4                         | 14.6 | 14.8 | 15.0 | 15.2 | 15.5 |
| Ιουλ  | 14.2                         | 14.4 | 14.5 | 14.7 | 14.9 | 15.2 |
| Αυγ   | 13.4                         | 13.5 | 13.6 | 13.7 | 13.8 | 13.9 |
| Σεπ   | 12.2                         | 12.2 | 12.3 | 12.3 | 12.3 | 12.3 |
| Οκτ   | 11.1                         | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 10.7 | 10.7 |
| Νοε   | 10.1                         | 9.9  | 9.8  | 9.6  | 9.4  | 9.2  |
| Δεκ   | 9.6                          | 9.4  | 9.2  | 9.0  | 8.8  | 8.5  |

# Ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος = $f_s * S_0$

- Ένα μέρος της ανακλάται και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα
- Το υπόλοιπο εισέρχεται στο έδαφος (ή στην υδατική επιφάνεια) και αυξάνει τη θερμοκρασία του. Το ποσοστό της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο έδαφος είναι:

$$S_n = (1 - a)f_s S_0 \quad [\text{kJ}/(\text{m}^2\text{d})]$$

όπου  $a$  είναι ο βαθμός ανακλαστικότητας του εδάφους ή λευκαύγεια (albedo)

Τυπικές τιμές της  
λευκαύγειας (albedo)

|                                               |                   |
|-----------------------------------------------|-------------------|
| Νερό<br>τυπική τιμή                           | 0.04-0.10<br>0.08 |
| Έδαφος                                        | 0.10-0.25         |
| Έρημος                                        | 0.20-0.35         |
| Κωνοφόρο δάσος                                | 0.11-0.16         |
| Δενδρώδεις καλλιέργειες                       | 0.15-0.20         |
| Λοιπές Καλλιέργειες<br>τυπική τιμή για Ελλάδα | 0.20-0.26<br>0.25 |
| Παλιό χιόνι                                   | 0.35-0.65         |
| Φρέσκο χιόνι                                  | 0.80-0.90         |

# Ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας

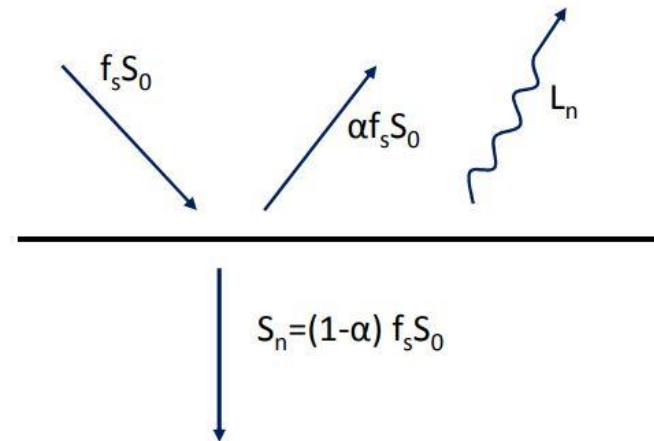
- Είναι η διαφορά της καθαρής ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων που εισέρχεται στην επιφάνεια του εδάφους, μείον την καθαρή θερμική ακτινοβολία της γης

$$R_n = S_n - L_n$$

Η ποσότητα αυτή ενέργειας, μετατρέπεται σε:

- λανθάνουσα θερμότητα  $\Lambda$  (ενέργεια που δαπανάται για την εξάτμιση του νερού)
- αισθητή θερμότητα  $H$  (ποσότητα ενέργειας που επάγεται από το υδάτινο σώμα στην ατμόσφαιρα)

$$R_n = H - \Lambda$$



Ενεργειακό ισοζύγιο σε υδάτινη ή εδαφική επιφάνεια

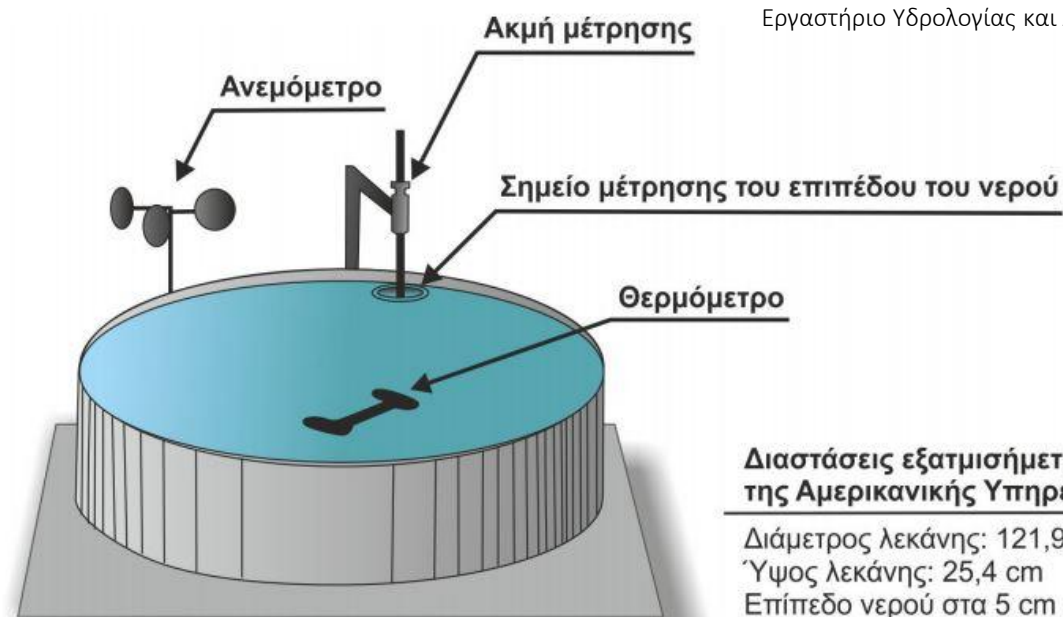
# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

# Υπολογισμός εξάτμισης –

## 1. Λεκάνη εξάτμισης

Εξατμισίμετρο ανοιχτού δοχείου – λεκάνη εξάτμισης:

- Το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο όργανο
- Μετρήσεις της στάθμης του νερού εκτελούνται ημερησίως σε φρεάτιο ηρεμίας με μετρητική συσκευή
- Το ύψος του εξατμιζομένου νερού προσδιορίζεται από τη διαφορά των αναγνώσεων, κατόπιν διορθώσεως λόγω προσθήκης ή αφαίρεσης νερού στη λεκάνη και λόγω βροχόπτωσης
- Εξάτμιση από μικρές επιφάνειες > εξάτμιση μεγάλων υδάτινων επιφανειών → πολλαπλασιασμός με συντελεστή λεκάνης εξάτμισης (0.6 - 0.8)



Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012

**Διαστάσεις εξατμισήμετρου τύπου Α της Αμερικανικής Υπηρεσίας Καιρού**

Διάμετρος λεκάνης: 121,9 cm

Ύψος λεκάνης: 25,4 cm

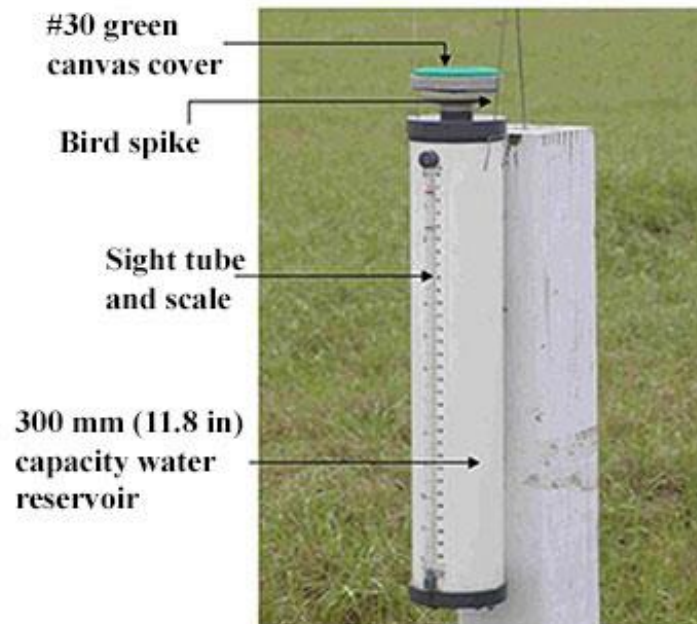
Επίπεδο νερού στα 5 cm από το χείλος της λεκάνης

# Υπολογισμός εξάτμισης –

## 2. Ατμόμετρο

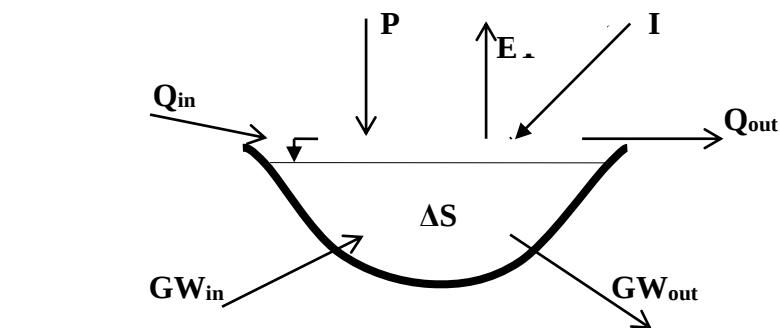
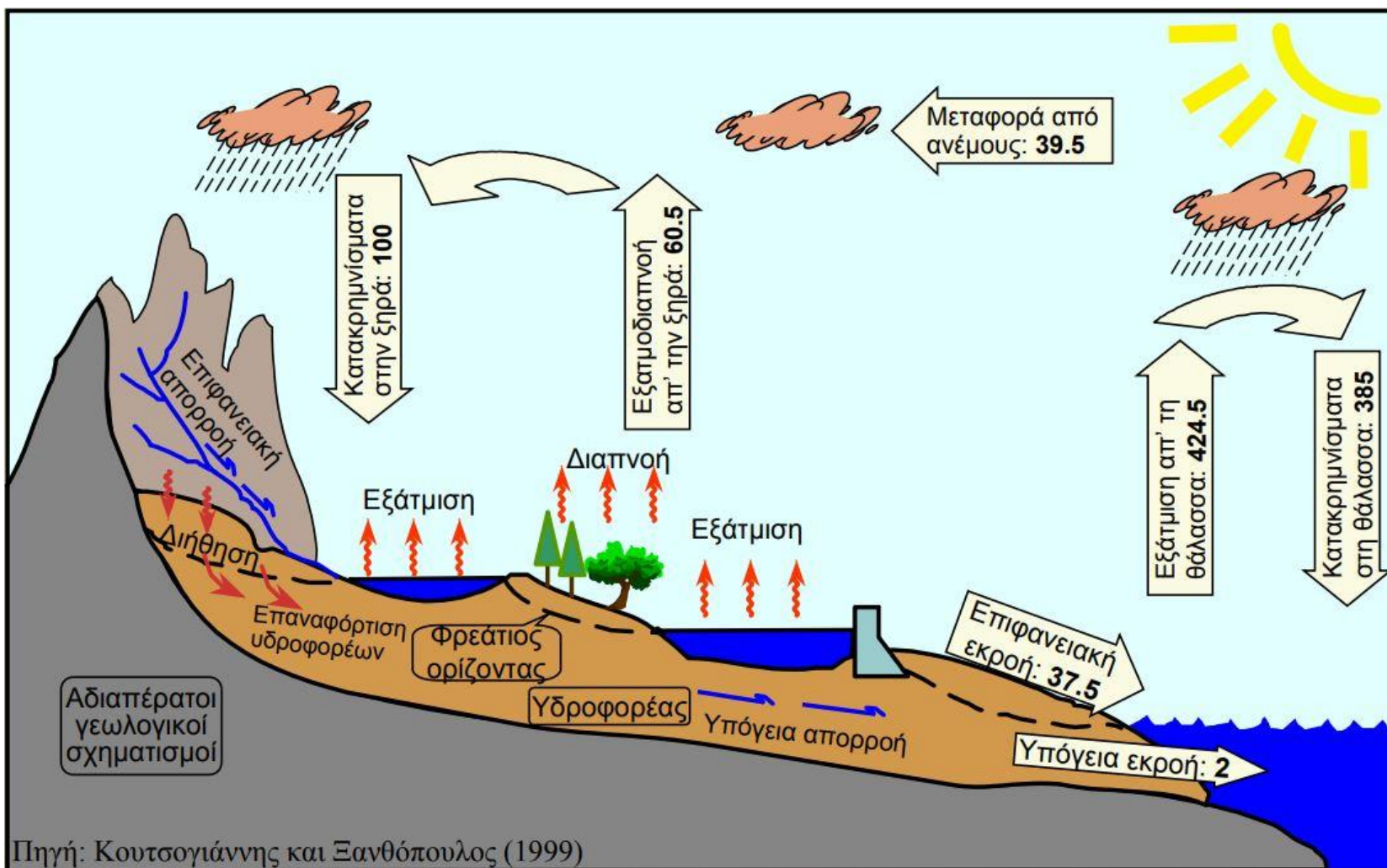
### Ατμόμετρο:

- Λειτουργία ανάλογη με αυτήν του εξατμισίμετρου, με τη διαφορά ότι στο όργανο αυτό δεν υπάρχει ελεύθερη επιφάνεια νερού, αλλά μια πορώδης επιφάνεια που τροφοδοτείται από δοχείο
- Η ελάττωση της στάθμης του νερού στο δοχείο, συνδέεται με την εξάτμιση με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών



# ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

# Υπολογισμός Εξάτμισης: Υδατικό Ισοζύγιο



$P$  = βροχόπτωση  
 $Q_{in}$  = επιφανειακή απορροή  
 $\Delta S$  = αλλαγή όγκου  
 $Q_{out}$  = εκροές  
 $G_{Win}$  = εισροές υπογείων νερών  
 $G_{Wout}$  = εκροές υπογείων νερών  
 $E$  = εξάτμιση  
 $I$  = άρδευση

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P + Q_{in} + G_{Win} - G_{Wout} - Q_{out} + I - E \Rightarrow$$

$$E = P + (Q_{in} - Q_{out}) + (G_{Win} - G_{Wout}) + I - \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

★ Για μακρόχρονη εκτίμηση της εξάτμισης

# ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 1. Ενεργειακό ισοζύγιο

Ολική καθαρή εισερχόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης  $R_N$  μετατρέπεται σε: (1) ροή θερμότητας  $L_v \cdot p_w \cdot E$  λόγω εξάτμισης, (2) σε ροή αισθητής θερμότητας  $H_s$ , που επάγεται από το υδάτινο σώμα στην ατμόσφαιρα και (3) σε ροή θερμότητας που μεταφέρεται στο έδαφος  $G$ :

$$R_N = L_v \cdot p_w \cdot E + H_s + G \Rightarrow E = \frac{R_N - (H_s + G)}{L_v \cdot p_w}$$

Μερικές φορές  $H_s + G \rightarrow 0$ , άρα ροή ET:  $E = \frac{R_N}{L_v \cdot p_w}$

Ενέργεια Υγρού:  $E_y = E_u + \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 + m \cdot g \cdot z$

Εσωτερική Ενέργεια

Κινητική Ενέργεια

Δυναμική Ενέργεια

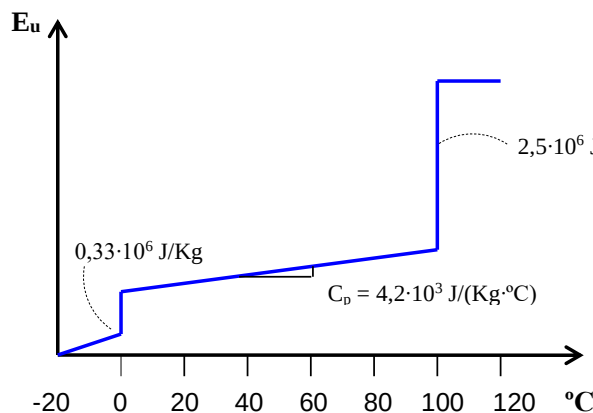
Αισθητή θερμότητα  
(Sensible heat)

$$E_u = C_p \cdot dT$$

(κομμάτι εσωτερικής θερμοκρασίας που είναι ανάλογο των αλλαγών της θερμοκρασίας του)

Λανθάνουσα θερμότητα  
(Latent heat)  $\lambda = 2.501 \cdot 10^6 - 2370 \cdot T_s$   
[J/kg]

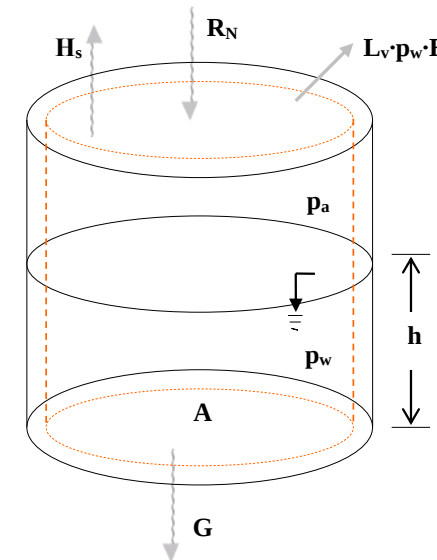
Αλλαγή φάσης (στερεό, υγρό, αέριο) δίνει ή απορροφά θερμοκρασία



Λανθάνουσα θερμότητα  
πάγου → νερό

Λόγος Bowen:  $B = \frac{H}{\Lambda}$  (αισθητή προς λανθάνουσα θερμότητα)

$$\text{Εξάτμιση: } E_t = \frac{\Lambda}{\lambda} = \frac{R_N}{\lambda(1+B)} \text{ [kg/md}^2\text{]}$$



$R_N$  = εισερχόμενη ακτινοβολία

$H_s$  = ροή αισθητής θερμότητας προς τον αέρα  
(Sensible heat to air)

$G$  = ροή θερμότητας που μεταφέρεται στο έδαφος λόγω διαφοράς θερμοκρασίας  
(Heat conducted to ground)

$L_v \cdot p_w \cdot E$  = ροή θερμότητας λόγω εξάτμισης

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 1. Ενεργειακό ισοζύγιο – Παράδειγμα

$$\text{Ισχύει: } R_N = L_v \cdot p_w \cdot E + H_s + G \Rightarrow E = \frac{R_N - (H_s + G)}{L_v \cdot p_w}$$

$$\text{Μερικές φορές } H_s + G \rightarrow 0, \text{ οπότε: } E = \frac{R_N}{L_v \cdot p_w}$$

$$\lambda = 2.501 \cdot 10^6 - 2370 \cdot T_s$$

$$R_N = 200 \text{ W/m}^2$$

$$T_s = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_s + G \rightarrow 0$$

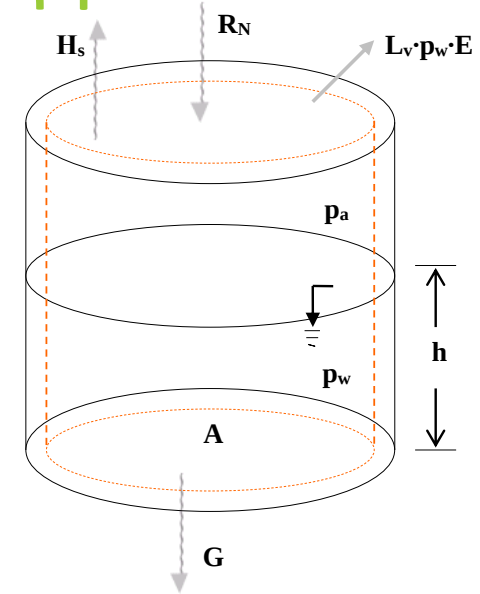
$$\text{Είναι: } L_v = 2.501 \cdot 10^6 - 2370 \cdot T_s = 2,501 \cdot 10^6 - 2370 \cdot (25 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$\Rightarrow L_v = 2441 \text{ KJ/Kg}$$

και

$$p_w = 997 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Άρα, } E = \frac{R_N}{L_v \cdot p_w} = \frac{200}{(2441 \cdot 10^3) \cdot (997)} = 8,22 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}} \Rightarrow E = 7.1 \frac{\text{mm}}{\text{day}}$$



$R_N$  = εισερχόμενη ακτινοβολία

$H_s$  = ροή αισθητής θερμότητας προς τον αέρα  
(Sensible heat to air)

$G$  = ροή θερμότητας που μεταφέρεται στο έδαφος λόγω διαφοράς θερμοκρασίας  
(Heat conducted to ground)

$L_v \cdot p_w \cdot E$  = ροή θερμότητας λόγω εξάτμισης

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 2. Αεροδυναμική Μέθοδος (μεταφορά μάζας)

A) Dalton (1802):  $E = B(e_s - e)$

$$\text{όπου } B = \frac{0.622k^2 \cdot p_a \cdot u_2}{p \cdot p_w \left( \ln \frac{z_2}{z_0} \right)}$$

όπου:

$E$  = εξάτμιση

$e_s$  = υγρασία κορεσμού

$e$  = ειδική υγρασία αέρα

$B$  = συντελεστής μεταφοράς υγρασίας

$k$  = σταθερά του Von Karman ( $\approx 0,4$ )

$p_a$  = πυκνότητα αέρα

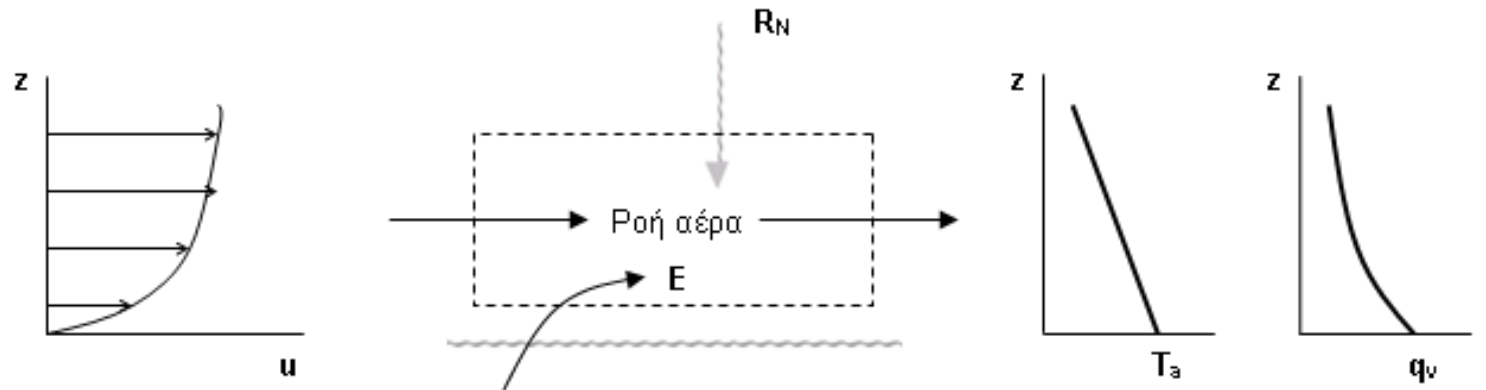
$u_2$  = ταχύτητα αέρα στα 2 m

$p$  = ατμοσφαιρική πίεση

$p_w$  = πυκνότητα νερού

$z_2$  = ύψος μέτρησης

$z_0$  = μήκος τραχύτητας επιφάνειας



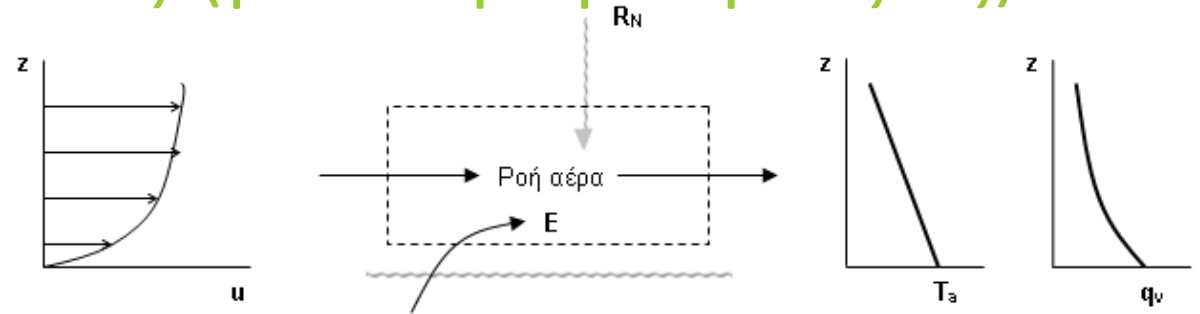
# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 2. Αεροδυναμική Μέθοδος (μεταφορά μάζας)

$$A) E = F(u)(e_s - e) = DF(u) \text{ [kg/(m}^2\text{d)]}$$

όπου  $D$  το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών  
 $F(u)$  η συνάρτηση του ανέμου.

Κατά Penman δίνεται από τη γραμμική εξίσωση:  $F(u) = 0.26(1 + 0.54u) \text{ [hPa kg/(m}^2\text{d)]}$   
και  $u$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε  $\text{[m/s]}$  μετρημένη σε ύψος 2 m από το έδαφος



B) Νόμος διάχυσης του Fick:

$$E = -M \frac{de}{dz}$$

όπου  $E$  = ο ρυθμός εξάτμισης

$e$  = η μερική πίεση υδρατμών

$M$  = ο συντελεστής μεταφοράς και

$z$  = το τοπογραφικό υψόμετρο

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 3. Μέθοδοι συνδυασμού – Η μέθοδος Penman

- Η μέθοδος ενεργειακού ισοζυγίου χρησιμοποιείται όταν η παροχή ενέργειας είναι ο περιοριστικός παράγοντας.
- Η αεροδυναμική μέθοδος χρησιμοποιείται όταν η μεταφορά υδρατμών είναι περιοριστική.
- Μέθοδος συνδυασμού: όταν και οι δύο παραπάνω παράμετροι είναι περιοριστικές

Μέθοδος Penman (1948): Συνδυάζει μεθόδους ισοζυγίου ενέργειας με μεταφοράς μάζας

$$R_n - H_s - G = \underbrace{L_v \cdot \dot{m}_v}_{\text{change of internal energy}} = \frac{dH}{dt}$$

Όπου  $G \rightarrow 0$  και  $L_v$  = λανθάνουσα θερμότητα

Υποθέτοντας  $\beta = \frac{H_s}{L_v \cdot \dot{m}_v} = \frac{\text{sensible heat flux}}{\text{vapor heat flux}}$ , με  $\beta$  = λόγος του Bowen (Bowen Ratio, Bowen 1926)

προκύπτει:

$$R_n = L_v \cdot \dot{m}_v \cdot (1 + \beta)$$

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 3. Μέθοδοι συνδυασμού – Η μέθοδος Penman

$$R_n = L_V \cdot \dot{m}_v \cdot (1 + \beta)$$

Χρησιμοποιώντας τις αεροδυναμικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του  $\beta$  και τις εξισώσεις μεταφοράς για τον ατμό και τη θερμότητα, έχουμε:

$$\dot{m}_v = -p_a \cdot K_w \cdot \frac{dq_v}{dz}$$

$$H_s = -p_a \cdot C_p \cdot K_h \cdot \frac{dT}{dz}$$

Όπου:

$K_w, K_h$  = συντελεστές στροβιλώδους μεταφοράς υδρατμών και θερμότητας

$K_h$  = heat diffusivity

$C_p$  = ειδική θερμότητα = 1005 J/(Kg · °K) στον αέρα

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 3. Μέθοδοι συνδυασμού – Η μέθοδος Penman

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εξισώσεις στο λόγο του Bowen, προκύπτει:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{H_s}{L_v \cdot \dot{m}_v} = \frac{-p_\alpha \cdot C_p \cdot K_h \cdot \frac{dT}{dz}}{-L_v \cdot p_\alpha \cdot K_w \cdot \frac{dq_v}{dz}} = \frac{C_p \cdot K_h \cdot dT}{L_v \cdot K_w \cdot dq_v} \\ \text{Όμως} \\ q_v &= 0,622 \cdot \frac{e}{p} \end{aligned} \right\} \beta = \frac{C_p \cdot K_h \cdot p \cdot (T_2 - T_1)}{L_v \cdot K_w \cdot 0,622 \cdot (e_2 - e_1)}$$

Άρα:

$$\beta = \gamma \cdot \left( \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1} \right)$$

Όπου  $\gamma = \frac{C_p \cdot K_h \cdot p}{L_v \cdot K_w \cdot 0,622}$   $\beta = \gamma \cdot \left( \frac{T_2 - T_1}{e_2 - e_1} \right)$  είναι η ψυχομετρική σταθερά (psychrometric constant), η οποία ισούται περίπου με 0,66 mb/°K σε T = 20 και p = 1000 mbar.

$$\frac{K_h}{K_w} = 1.0$$

$$\Delta = \frac{de_s}{dT} \text{ η κλίση καμπύλης κορεσμένων ατμών με τη θερμοκρασία}$$

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 3. Μέθοδοι συνδυασμού – Η μέθοδος Penman

Συνοπτικά έχουμε:

A) Ισοζύγιο Ενέργειας:  $E_r = \frac{R_n}{L_v \cdot p_w}$

B) Αεροδυναμική Μέθοδος:  $E_a = B \cdot (e_{as} - e_a)$

Γ) Συνδυαστική Μέθοδος:  $R_n = L_v \cdot \dot{m}_v \cdot (1 + \beta) = L_v \cdot p_w \cdot E \cdot (1 + \beta)$

$$\Rightarrow (1 + \beta) \cdot E = \frac{R_n}{L_v \cdot p_w} = E_r$$

$$E = E_r - \beta \cdot E = E_r - \beta \cdot L_v \cdot \dot{m}_v = E_r - \beta \cdot L_v \cdot p_w \cdot E_a$$



Εξίσωση Penman (1948): η πιο ακριβής μέθοδος

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot E_a$$

με  $\underbrace{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}}_{weights} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} = 1$

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 3. Μέθοδοι συνδυασμού – Η μέθοδος Penman

Μέθοδος Penman (1948): Συνδυάζει μεθόδους ισοζυγίου ενέργειας με μεταφοράς μάζας (η πιο ακριβής μέθοδος)

Εξάτμιση από υδάτινη επιφάνεια κατά Penman:  $E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot F(u) \cdot D$  [hPa]

όπου  $\gamma$  ο ψυχομετρικός συντελεστής [hPa/°C] (τυπική τιμή = 0.67 hPa/°C)

$\Delta$  η κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών [hPa/°C]

$R_n$  η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας [kJ/(m²d)]

$\lambda$  η λανθάνουσα θερμότητας εξάτμισης [kJ/kg]

$F(u)$  η συνάρτηση ταχύτητας του ανέμου [kg/(hPa m²d)]

$D$  το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών [hPa]

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T+237.3)^2}, e_s = 6.11 \exp\left(\frac{17.27+T}{237.3+T}\right)$$

$$R_n = S_n - L_n$$

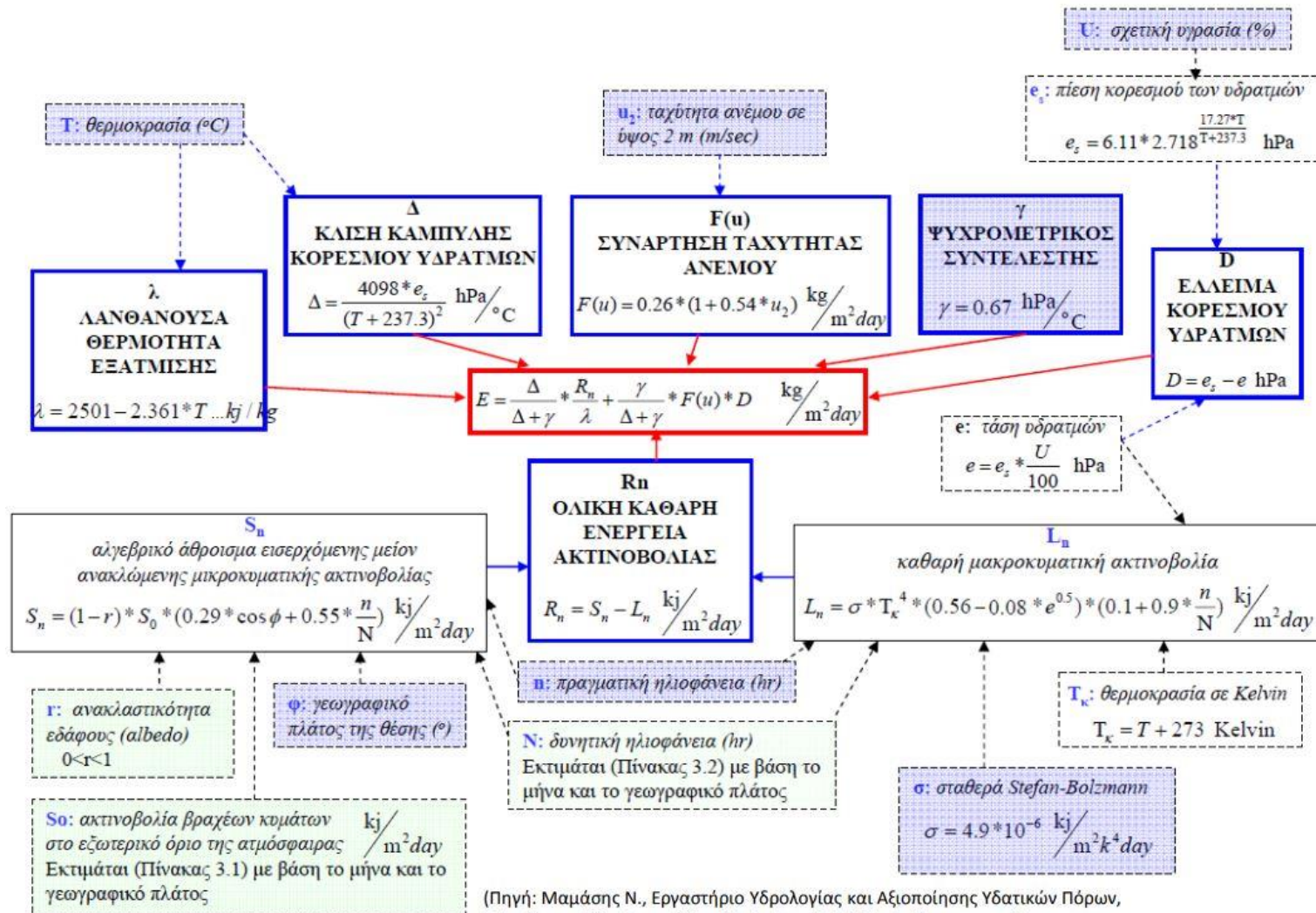
$$\lambda = 2501 - 2.361T$$

$$F(u) = 0.26(1 + 0.54u_2)$$

$$D = e_s - e$$

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 3. Μέθοδοι συνδυασμού – Η μέθοδος Penman



# Υπολογισμός Εξάτμισης

## 4. Μέθοδοι συνδυασμού – Priestley & Taylor

Μέθοδος Priestley & Taylor (1972): Οι Priestley & Taylor βρήκαν ότι:

$$\frac{\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot E_a}{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_r} \cong 0,3 \quad \Rightarrow \quad E = a \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_r$$

όπου  $a=1.3$

Pan evaporation =  $E_p$  (Standard Weather Bureau Class A pan-Unpainted galvanised iron  
= 4 ft, h = 10 in)

d

$$E = K_p \cdot E_p$$

$0 \leq K_p \leq 1$  pan evaporation coefficient

$K_p \approx 0.7$  (aboveground; 0.8 floating)

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## Παράδειγμα (1)

Open water  $u_2 = 3 \text{ m/s}$   $E = ?$   
 $R_N = 200 \text{ W/m}^2$   $\Delta z = 2 \text{ m}$   
 $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$   $P = 101,3 \text{ KPa}$   
 $R_h = 40 \text{ \%}$  (σχετική υγρασία)  $z_o = 0,03 \text{ cm}$

$$E_r = \frac{R_n}{L_v \cdot p_w} = \frac{200}{2441 \cdot 10^3 \cdot 997} = 8,22 \cdot 10^{-8} \text{ m/s} = 7,1 \text{ mm/day}$$

$$E_a = B \cdot (e_{as} - e_a) = B \cdot (e_{as} - R_h \cdot e_{as})$$

$$B = \frac{0,622 \cdot k^2 \cdot p_a \cdot u_2}{p \cdot p_w \cdot \left[ \ln \cdot \frac{z_2}{z_o} \right]^2} = \frac{(0,622) \cdot (0,4)^2 \cdot (1,19 \text{ Kg/m}^3) \cdot (3 \text{ m/s})}{(101,3 \cdot 10^3 \text{ Pa}) \cdot (997) \cdot \left[ \ln \cdot \frac{2}{3 \cdot 10^{-4}} \right]^2} = 4,54 \cdot 10^{-11} \text{ m/Pa} \cdot \text{s}$$

$$e_{as} \text{ from Table} = 3167 \text{ Pa at } 25^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow E_a = 8,62 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s} = 7,45 \text{ mm/day}$$

# Υπολογισμός Εξάτμισης

## Παράδειγμα (2)

Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν:

$$e_{as} = 611 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_a}{237,3 \cdot T_a}\right) = 3167 \text{ Pa}$$

$$p_a = \frac{p}{R_a \cdot T} = \frac{101,3 \cdot 10^3}{(287) \cdot (298)} = 1,19 \text{ Kg/m}^3$$

$$\Delta = \frac{4098 \cdot \varepsilon_{as}}{(237,3 + T)^2} = \frac{4098 \cdot 3167}{(237,3 + 25)^2} = 188,7 \text{ Pa/}^\circ\text{C}$$

$$L_v = 2500 - 2,36 \cdot 25 = 2441 \text{ KJ/Kg}$$

$$\gamma = \frac{C_p \cdot K_h \cdot p}{0,622 \cdot L_v \cdot K_w} = \frac{1005 \cdot 1 \cdot (101,3 \cdot 10^3)}{0,622 \cdot 2441 \cdot 10^3} = 67,1 \text{ Pa/}^\circ\text{C}$$

$$\text{Έτσι: } \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} = 0,262 \quad \text{και} \quad \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} = 0,738, \quad E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot E_a = 7,2 \text{ mm/day}$$

$$\text{Χρήση Priestley \& Taylor: } E = 1,3 \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_r = 6,8 \text{ mm/day}$$

ΔΙΑΠΝΟΗ

# Διαπνοή

## Μηχανισμοί

### Έδαφος:

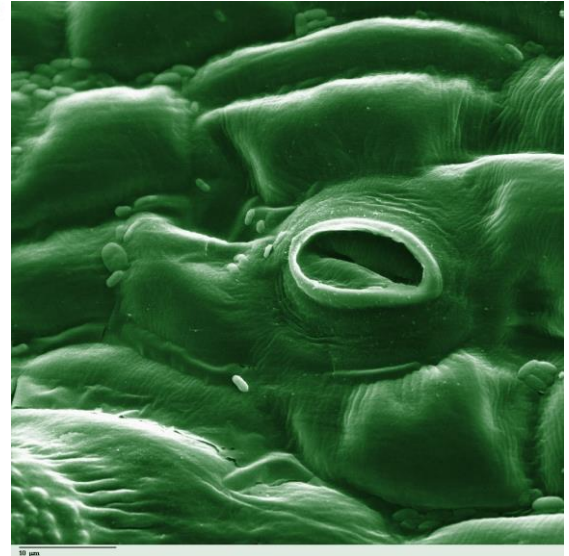
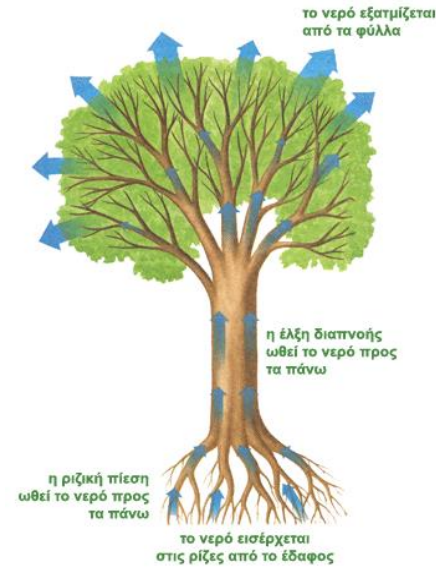
- $H_2O$  reservoir – moisture content
- Permanent wilting point

Concentration differences (osmotic pressure) between root and soil  
→ move  $H_2O$  through root membrane

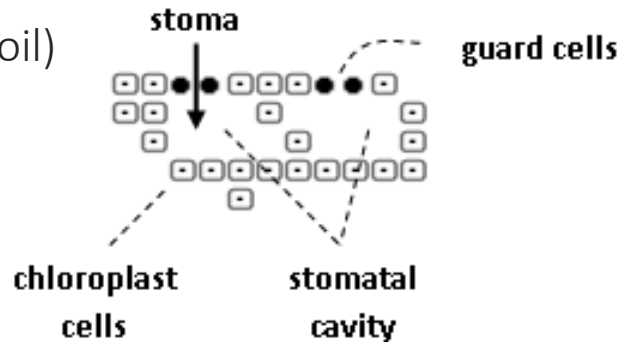
Rate of  $H_2O$  uptake =  $f(\text{root surface; } K \text{ of soil})$

### Φυτό:

- Root system (ρίζα)
- Xylem (hydraulic conductor of low resistance)
- Leaf (φύλλο)



Διαδικασία διαπνοής σε και λεπτομέρεια στομάτων διαπνοής



## Φωτοσύνθεση:

Οι χλωροπλάστες χρησιμοποιούν:



↑ από αέρα    ↑ από έδαφος

Καθώς ο αέρας εισέρχεται στο φύλλο (ανοιχτά στομάτα) το νερό διαφεύγει. Ατμόσφαιρα: Ίδιος ρόλος με την εξάτμιση

# Φυτικός Συντελεστής

$E_{tr}$  = ET of a reference crop

$$E_t = K_s \cdot K_c \cdot E_{tr}$$

↑  
Ίδιες συνθήκες

$K_s$  = soil coefficient,  $0 \leq K_s \leq 1$

$K_c$  = crop coefficient,  $0,2 \leq K_c \leq 1,3$

If the soil is well watered  $\rightarrow K_s = 1$

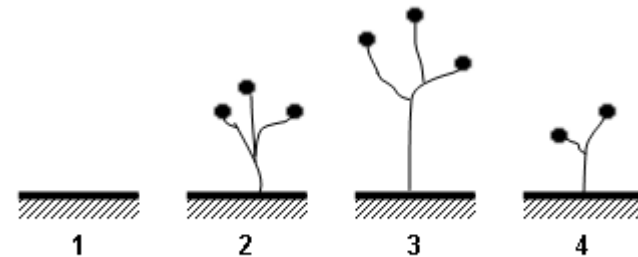
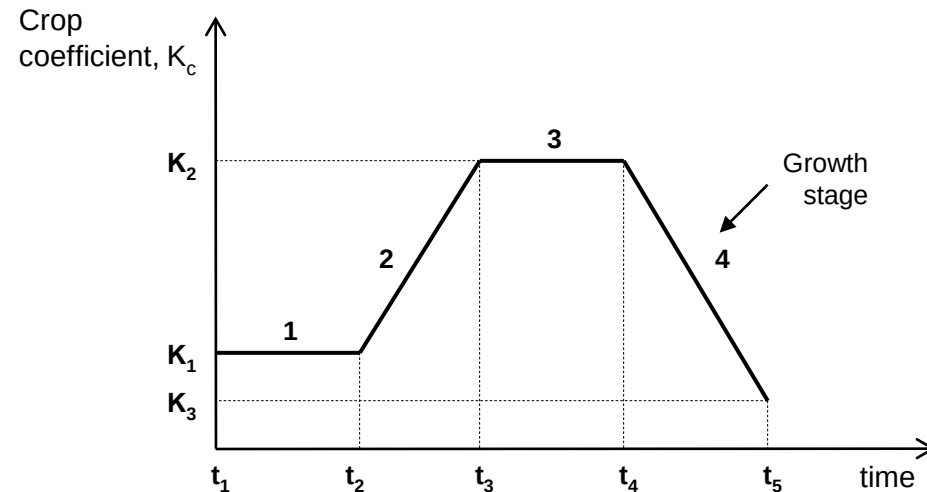
*Example*

$E_{tr}$  = (May) = 5,82 mm/day

$K_c = 0,38$

$E_t = 0,38 \cdot 5,82 = 2,07$  mm/day

Crop uptake

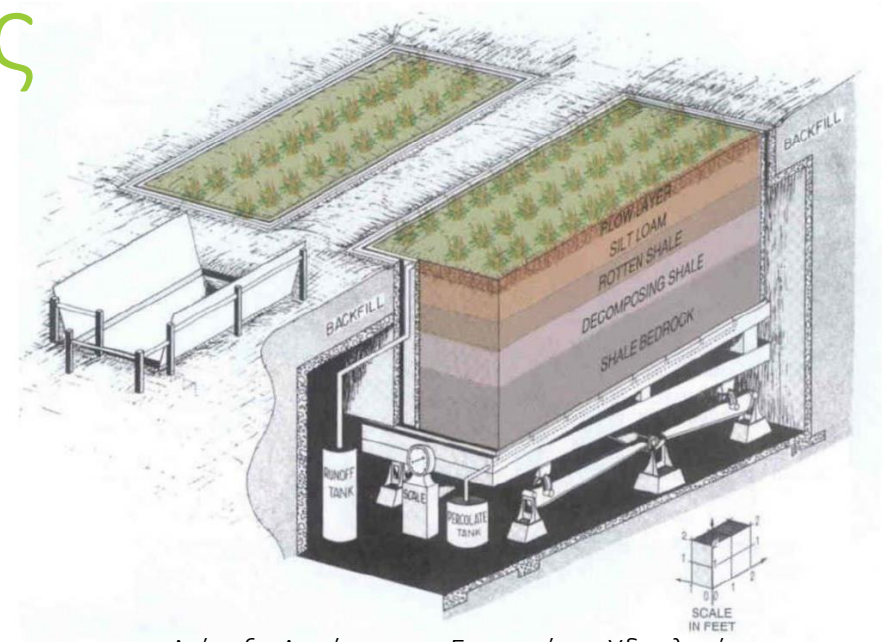


# ΑΜΕΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής Άμεση Εκτίμηση

## Α) Δεξαμενές

Στεγανά δοχεία που τοποθετούνται στο έδαφος, με το χείλος στο ίδιο επίπεδο με την επιφάνεια του εδάφους. Προσομοίωση φυσικών συνθηκών ανάπτυξης των φυτών για το υπό εξέταση είδος βλάστησης. Μετρίεται η ποσότητα του νερού που απαιτείται για τη διατήρηση σταθερών, βέλτιστων συνθηκών υγρασίας



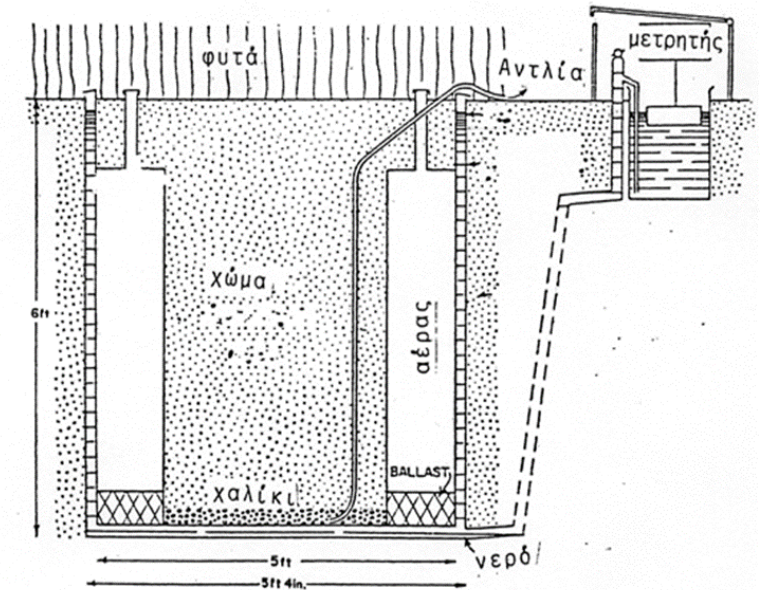
Διάταξη Λυσίμετρου. Εργαστήριο Υδρολογίας

## Β) Λυσίμετρα

Η πιο ακριβής μέθοδος. Κάθε συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου μετρίεται ακριβώς και η εξατμισοδιαπνοή αντιπροσωπεύεται ως απώλεια βάρους. Δύο κατηγορίες: ζυγιζόμενα και μη.

## Γ) Χρήση Αγροτεμαχίων

Ειδικά σχεδιασμένα αγροτεμάχια ώστε το νερό που απορρέει από την επιφάνειά τους να μπορεί να συλλεχτεί και μετρηθεί (υπόγειες στεγανωτικές στρώσεις, μέτρηση εισροής νερού από βροχόπτωση και άρδευση, μέτρηση απωλειών, διόρθωση για εδαφική υγρασία.

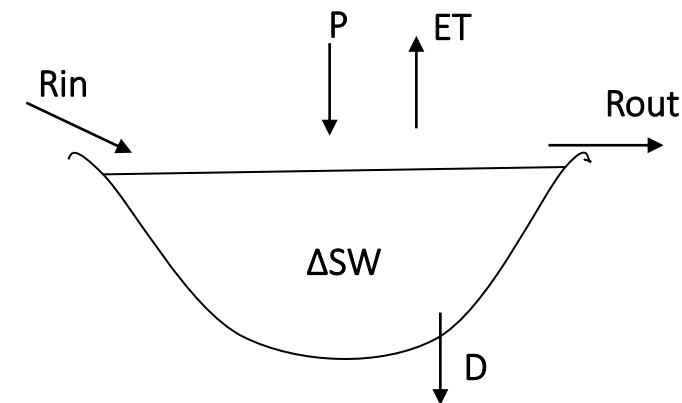
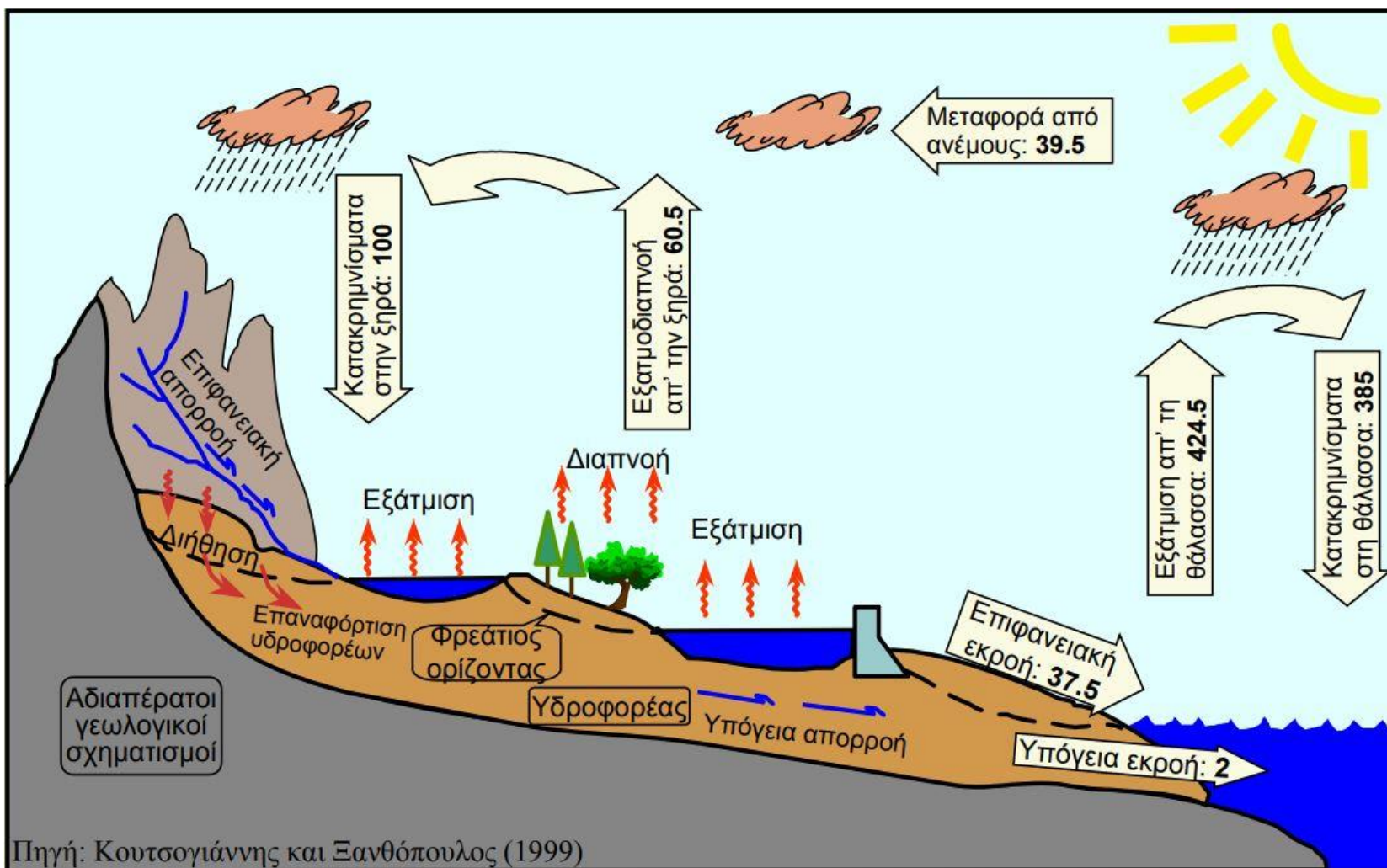


Λυσίμετρο (Τσακίρης, 1995)

# ΕΜΜΕΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ: ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## Υδατικό Ισοζύγιο



P = βροχόπτωση

$\Delta SW$  = αλλαγή περιεκτικότητας εδάφους σε νερό

RO = επιφανειακή απορροή

D = η βαθιά διήθηση

Όταν δεν υπάρχει άρδευση:

$$ET = P + \Delta SW \pm RO - D$$



Μειονέκτημα: χαμηλού επιπέδου ακρίβεια των μετρήσεων και δυσκολίες εκτίμησης της ET στη διάρκεια των περιόδων βροχής

# ΕΜΜΕΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΥΝΗΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ: ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΠΟ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## 1. Μέθοδος Penman - Monteith

Use *combination* method

$$ET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot E_a$$

but *adjust for local conditions*

$$B = 0,0027 \cdot \left(1 + \frac{u}{100}\right) \frac{\text{Doorenbos and Pruitt}}{\text{mm}} \\ B = \frac{\text{mm}}{\text{day} \cdot \text{Pa}}$$

$u$  = *total distance of wind travel during 24 hrs = 24 hr wind run, Km/day | 2 m*

$$E_a = B \cdot (e_{as} - e_a)$$

Pennman

$$PET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot E_r + \frac{p_a \cdot C_p}{r_a \cdot (\Delta + \gamma)} \cdot (e_{as} - e_a)$$

$$r_a = \frac{K_m}{K_h} \cdot \frac{1}{K^2} \cdot \frac{\ln^2(z/z_0)}{\bar{u}} = \text{atm dif. resistance}$$

Pennman – Monteith

$$PET = \frac{\Delta \cdot E_r + (p_a \cdot C_p / r_a) \cdot (e_{as} - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot \left(i + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

for unsaturated soil,  $r_s$  = stomatal resistance (soil resistance)

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## 1. Μέθοδος Penman - Monteith

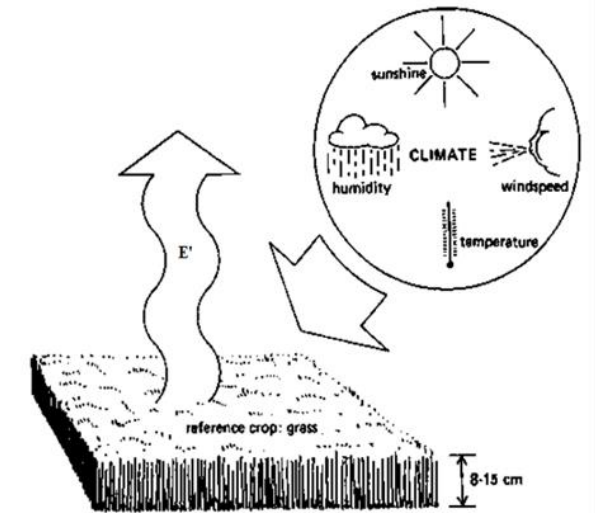
**Μέθοδος Penman Monteith:** ο Monteith εισήγαγε την επιφανειακή αντίσταση των στομάτων των φυλλωμάτων στην εξατμηση:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} \cdot \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma'}{\Delta + \gamma'} \cdot F(u) \cdot D \text{ [hPa]}$$

όπου  $\gamma' = (1 + 0.33u)\gamma$  [hPa/°C] η τροποποιημένη έκφραση του ψυχομετρικού συντελεστή που λαμβάνει υπόψη την αντίσταση των στομάτων.

Η ταχύτητα του ανέμου  $u$  είναι σε [m/s]

$F(u) = \frac{90}{T+275} u$  [kg/(hPa m<sup>2</sup>d)] η τροποποιημένη συνάρτηση ταχύτητας του ανέμου

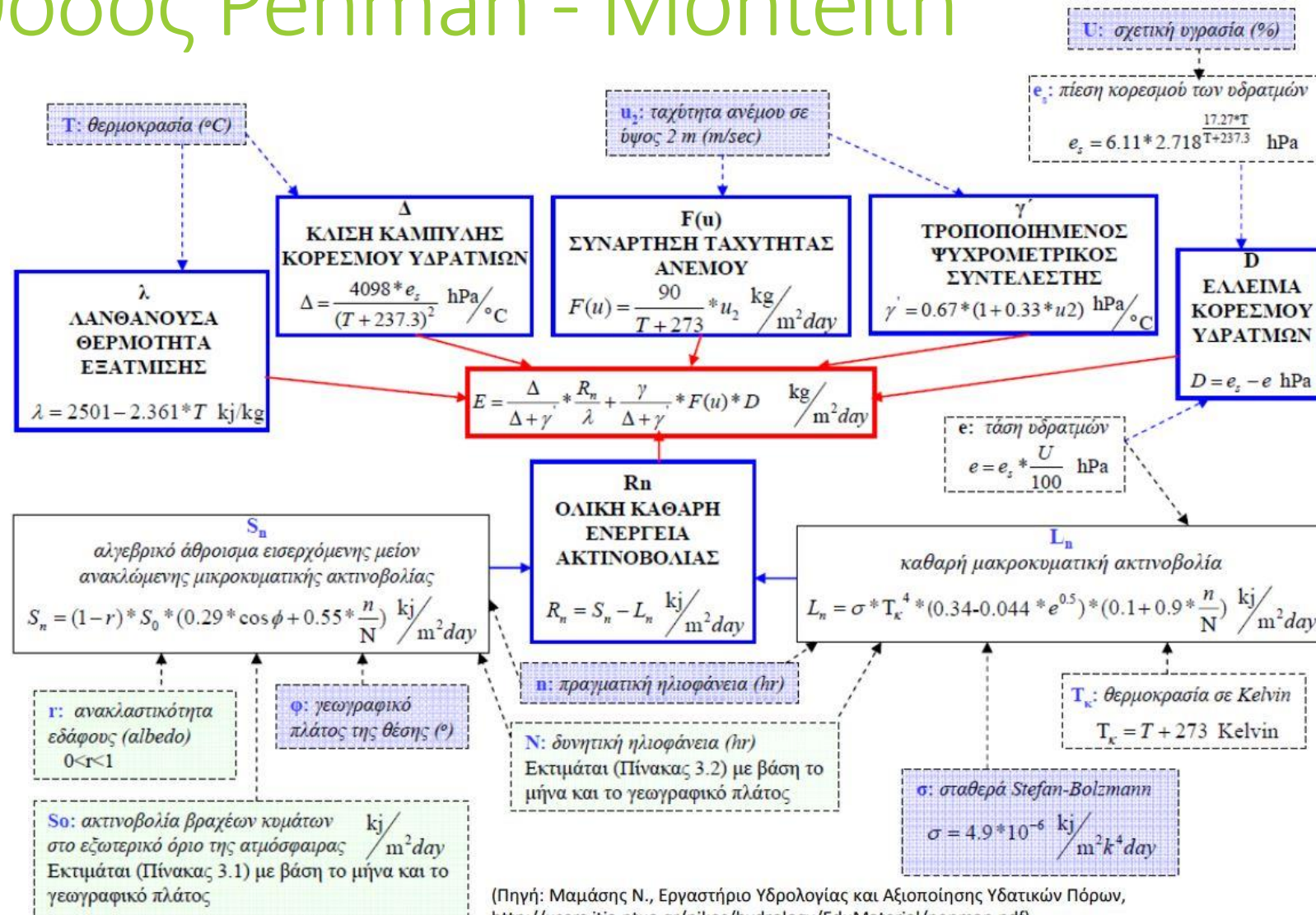


Εικόνα. Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς

Οι υπόλοιπες μεταβλητές υπολογίζονται όπως ακριβώς και στη μέθοδο Penman, με τη διαφορά ότι τροποποιείται ο συντελεστής ανάκλασης  $\alpha$  (albedo), λαμβάνοντας συνήθως μεγαλύτερες τιμές, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η καθαρή ακτινοβολία  $R_n$ .

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## 1. Μέθοδος Penman - Monteith



# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## 2. Μέθοδος Thornthwaite

**Μέθοδος Thornthwaite (1948):** χρησιμοποιείται για περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού. Εκτίμηση μηνιαίας ΕΤ βάσει μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας:

$$PET = 16 \left( \frac{10t_i}{J} \right)^a \frac{\mu N}{360}$$

όπου *PET* η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα  
*t<sub>i</sub>* η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C  
*μ* ο αριθμός ημερών  
*N* η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας  
*J* ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας  
(δίνεται από τη σχέση  $J = \sum_{i=1}^{12} j_i$ )  
*j<sub>i</sub>* ο μηνιαίος δείκτης θερμοκρασίας ( $j_i = 0.09t_i^{3/2}$ )  
*a* εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από τον δείκτη *J*  
(*a* = 0.016

Μηνιαία ποσοστά ωρών ημέρας % των ωρών ημέρας του έτους

|                   | Μήνας |      |      |      |       |       |       |       |      |      |      |      |
|-------------------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Β.Γεωγ.<br>Πλάτος | Ιαν   | Φεβ  | Μαρ  | Απρ  | Μαι   | Ιουν  | Ιουλ  | Αυγ   | Σεπ  | Οκτ  | Νοε  | Δεκ  |
| 24                | 7.58  | 7.17 | 8.40 | 8.60 | 9.30  | 9.20  | 9.41  | 9.05  | 8.31 | 8.09 | 7.43 | 7.46 |
| 26                | 7.49  | 7.12 | 8.40 | 8.64 | 9.38  | 9.49  | 9.10  | 8.31  | 8.06 | 9.30 | 7.36 | 7.35 |
| 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 |
| 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 |
| 32                | 7.20  | 6.97 | 8.37 | 8.75 | 9.63  | 9.60  | 9.77  | 9.28  | 8.34 | 7.93 | 9.11 | 7.05 |
| 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 |
| 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 |
| 38                | 6.87  | 6.79 | 8.34 | 8.90 | 9.92  | 9.95  | 10.10 | 9.47  | 8.38 | 7.90 | 6.82 | 6.66 |
| 40                | 6.76  | 6.73 | 8.33 | 8.95 | 10.02 | 10.08 | 10.22 | 9.54  | 8.38 | 7.75 | 6.72 | 6.52 |
| 42                | 6.62  | 6.65 | 8.31 | 9.00 | 10.14 | 10.21 | 10.35 | 9.62  | 8.40 | 7.70 | 6.62 | 6.38 |
| 44                | 6.40  | 6.58 | 8.30 | 9.05 | 10.26 | 10.38 | 10.49 | 9.70  | 8.41 | 7.63 | 6.49 | 6.22 |
| 46                | 6.33  | 6.50 | 8.29 | 9.12 | 10.39 | 10.54 | 10.64 | 9.79  | 8.42 | 7.58 | 6.36 | 6.04 |
| 48                | 6.17  | 6.42 | 8.27 | 9.18 | 10.53 | 10.71 | 10.80 | 9.89  | 8.44 | 7.51 | 6.22 | 5.86 |
| 50                | 5.98  | 6.32 | 8.25 | 9.25 | 10.69 | 10.93 | 10.99 | 10.00 | 8.44 | 7.43 | 6.07 | 5.65 |

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## 3. Μέθοδος Blaney-Criddle

**Μέθοδος Blaney-Criddle (1962):** εμπειρική σχέση ανάμεσα σε ET, μέση θερμοκρασία, μέσο όρο ποσοστών ωρών ημέρας:

$$PET = k_c F = k_c \frac{(1.8t_i + 32)P}{3.94} \text{ [mm]}$$

όπου  $k_c$  εμπειρικός συντελεστής καλλιέργειας

$t_i$  η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε  $^{\circ}\text{C}$

$P$  το ποσοστό ωρών ημέρας του μήνα  $\rightarrow$  από πίνακα ή

$$P = 100 \frac{N \cdot \mu}{365 \cdot 12}$$

όπου  $N$  η μέση αστρονομική διάρκεια της μέρας σε h

$\mu$  ο αριθμός ημερών του συγκεκριμένου μήνα

Τιμές εποχικού φυτικού συντελεστή  $k_c$

| ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ         | Διάρκεια<br>Βλαστικής<br>Περίόδου σε μήνες | $k_c$       |
|---------------------|--------------------------------------------|-------------|
| Μηδική              | Μεταξύ Παγετών                             | 0.80 - 0.85 |
| Αραβόσιτος          | 4                                          | 0.75 - 0.85 |
| Βάμβαξ              | 7                                          | 0.60 - 0.70 |
| Σιτηρά              | 3                                          | 0.75 - 0.85 |
| Εσπεριδοειδή        | 12                                         | 0.45 - 0.55 |
| Φυλλοβόλα οπωροφόρα | Μεταξύ Παγετών                             | 0.60 - 0.70 |
| Φυτικό λιβάδι       | Μεταξύ Παγετών                             | 0.75 - 0.85 |
| Πατάτα              | 3-5                                        | 0.65 - 0.75 |
| Όρυζα               | 3-5                                        | 1.00 - 1.10 |
| Σακχαρότευτλα       | 6                                          | 0.65 - 0.75 |
| Τομάτα              | 4                                          | 0.65 - 0.70 |
| Λαχανικά            | 2-4                                        | 0.60 - 0.70 |

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## 3. Μέθοδος Blaney-Criddle

Μηνιαίοι φυτικοί συντελεστές αρδευόμενων καλλιεργειών (σχέση Blaney – Criddle)

| Καλλιέργ.   | Περιοχή          | I    | Φ    | M    | A    | M    | I    | I    | A    | Σ    | O    | N    | Δ    |
|-------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Μηδική      |                  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| "           | Θερμή, Πεδινή    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| "           | Παραθαλ. Υψηλή   | 0.35 | 0.45 | 0.60 | 0.70 | 0.85 | 0.95 | 1.00 | 1.00 | 0.95 | 0.80 | 0.55 | 0.30 |
| Αβοκάντο    | Εσωτερική Πεδινή | -    | -    | -    | 0.37 | 0.56 | 0.75 | 0.92 | 1.00 | 1.03 | 0.98 | 0.82 | -    |
| Αραβόσιτος  | Παραθαλ.         | -    | -    | 0.57 | 0.78 | 0.93 | 1.02 | 1.01 | 0.95 | 0.84 | 0.63 | 0.42 | -    |
| Βαμβάκι     | Πεδινή Εσωτερική | 0.15 | 0.25 | 0.40 | 0.52 | 0.63 | 0.73 | 0.75 | 0.69 | 0.60 | 0.48 | 0.32 | 0.19 |
| Χλοοτάπητας | Πεδινή Εσωτερική | -    | -    | -    | -    | 0.12 | 0.40 | 0.60 | 0.62 | 0.45 | -    | -    | -    |
| Πεπόνια     | Παραθαλ.         | -    | -    | -    | -    | 0.30 | 0.45 | 0.90 | 1.00 | 1.00 | -    | -    | -    |
| Οπωροφόρα   | - - -            | 0.24 | 0.38 | 0.55 | 0.70 | 0.88 | 0.92 | 0.94 | 0.92 | 0.80 | 0.72 | 0.54 | 0.35 |
| φυλλοβό     | - - -            | -    | -    | -    | -    | -    | 0.45 | 0.70 | 0.74 | 0.64 | -    | -    | -    |
| λα          | - - -            | -    | -    | 0.23 | 0.45 | 0.70 | 0.85 | 0.88 | 0.85 | 0.47 | 0.20 | -    | -    |
| Λεμονιά     | Παραθαλ.         | -    | -    | 0.40 | 0.40 | 0.50 | 0.55 | 0.60 | 0.60 | 0.60 | 0.50 | 0.40 | -    |
| Πορτοκαλιά  | Ενδιάμεση        | 0.27 | 0.34 | 0.40 | 0.46 | 0.50 | 0.53 | 0.54 | 0.54 | 0.52 | 0.48 | 0.43 | 0.30 |
| "           | Εσωτερική        | 0.33 | 0.39 | 0.45 | 0.50 | 0.54 | 0.56 | 0.57 | 0.57 | 0.56 | 0.53 | 0.47 | 0.38 |
| "           | Εσωτερική        | 0.37 | 0.44 | 0.49 | 0.54 | 0.57 | 0.60 | 0.62 | 0.62 | 0.60 | 0.57 | 0.51 | 0.43 |
| Καρυδιά     | Εσωτερική        | -    | -    | 0.13 | 0.30 | 0.55 | 0.84 | 0.98 | 0.88 | 0.60 | 0.37 | 0.20 | -    |
| Βοσκές      | Εσωτερική, Υψηλή | -    | -    | 0.10 | 0.27 | 0.42 | 0.52 | 0.57 | 0.55 | 0.35 | 0.15 | -    | -    |
| "           | Εσωτερική        | -    | -    | 0.16 | 0.45 | 0.65 | 0.75 | 0.78 | 0.74 | 0.55 | 0.20 | -    | -    |
| Πατάτα      | Εσωτερική, Ξηρή  | -    | -    | -    | 0.45 | 0.80 | 0.95 | 0.90 | -    | -    | -    | -    | -    |
| Σόργον      | Εσωτερική        | -    | -    | -    | -    | -    | 0.40 | 1.00 | 0.85 | 0.70 | -    | -    | -    |
| Σακχαρότ.   | Ενδιάμεση        | -    | -    | -    | 0.31 | 0.69 | 0.96 | 1.01 | 0.83 | -    | -    | -    | -    |
| "           | Παραθαλ.         | -    | -    | -    | 0.40 | 0.67 | 0.76 | 0.76 | 0.70 | 0.50 | 0.29 | -    | -    |
| "           | - - -            | -    | -    | -    | 0.37 | 0.42 | 0.43 | 0.44 | 0.43 | 0.38 | -    | -    | -    |
| Κριθάρι     | Εσωτερική, Ξηρή  | 0.32 | 0.60 | 0.98 | 1.08 | 0.45 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0.15 |
| Σιτάρι      | Εσωτερική        | 0.20 | 0.40 | 0.80 | 1.10 | 0.60 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| Τομάτα      | Παραθαλ.         | -    | -    | -    | -    | 0.41 | 0.74 | 0.93 | 0.98 | 0.89 | -    | -    | -    |
| Λαχανικά    |                  | -    | -    | -    | 0.23 | 0.49 | 0.67 | 0.78 | 0.78 | 0.64 | 0.40 | -    | -    |

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## 4. Μέθοδος Jensen-Haise

Μέθοδος Jensen-Haise (1963): από 3000 παρατηρήσεις ET με δειγματοληψία εδαφών για 35 έτη:

$$ET = C_T(T - T_x)R_s$$

όπου  $R_s$  η ηλιακή ακτινοβολία σε l/ημέρα

$C_T$  σταθερά θερμοκρασίας ίση με 0.025

$T_x$  η τεταγμένη του θερμοκρασιακού άξονα στο μηδέν, ίση με -3 αν η θερμοκρασία δίνεται σε °C

Οι συντελεστές είναι σταθεροί σε μια συγκεκριμένη περιοχή

$$C_T = \frac{1}{C_1 + C_2 C_H} \quad \text{και} \quad C_H = \frac{50mb}{e_2 - e_1}$$

όπου  $e_2, e_1$  το σημείο κορεσμού των υδρατμών στη μέγιστη και μέση θερμοκρασία για το θερμόμετρο του μήνα του έτους

$$C_2 = 7.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_1 = 38 - (2^\circ\text{C} \times \text{υψόμετρο σε m}/305)$$

$$T_x = -2.5 - 0.14(e_2 - e_1)^\circ\text{C}/mb - (\text{υψόμετρο σε m}/550)$$

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## 5. Μέθοδος Makkink

**Μέθοδος Makkink (1957):** οι μεγαλύτερες ποσότητες της ενέργειας που καταναλώνονται για την ΕΤ προέρχονται από δύο πηγές (1) την ενέργεια από ακτινοβολία και (2) την ενέργεια από τον αέρα που είναι θερμότερος από ότι η επιφάνεια. Και οι δύο ανάγονται στην ηλιακή ακτινοβολία. Γραμμική εξάρτηση ΕΤ από μικρού κύματος ακτινοβολία

$$ET_p = R_s \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} + 0.12$$

όπου το  $R_s$  μετατρέπεται σε ισοδύναμες μονάδες εξατμιζόμενου νερού



Καλά αποτελέσματα σε ξηρές περιοχές

# Υπολογισμός Εξατμισοδιαπνοής

## 6. Μέθοδος Hargreaves

Μέθοδος Hargreaves (1974): απλή μέθοδος που απαιτεί ελάχιστα κλιματικά δεδομένα

$$ET_p = MF(18T_a + 32)CH \text{ [mm/μήνα]}$$

όπου  $MF$  μηνιαίος συντελεστής που εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος (πίνακες)

$T_a$  η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε  $^{\circ}\text{C}$

$CH$  διορθωτικός παράγοντας για τη σχετική υγρασία  $RH$  που χρησιμοποιείται μόνον όταν η μέση ημερήσια σχετική υγρασία ξεπερνά το 64% (εναλλακτικά το  $CH$  είναι ίσο με μονάδα)

$$CH = 0.166(100 - RH)^{1/2}$$

Ο Hargreaves συνέκρινε τη μέθοδό του με δεδομένα  $ET$  από λυσίμετρα σε διάφορες περιοχές του κόσμου και ανέπτυξε εξισώσεις που συσχετίζουν την πραγματική  $ET$  με την  $ET_p$  σε διαφορετικές κλιματικές καταστάσεις.

# ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

# Υπολογισμός Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής

## 1. Μέθοδος TURC (1)

**Μέθοδος TURC (1961):** ανάλυση δεδομένων από 254 λεκάνες απορροής σε όλο τον κόσμο και συσχέτιση εξάτμισης με βροχόπτωση και θερμοκρασία:

$$E = \frac{P}{[0.9 + (P/I_T)^2]^{0.5}}$$

όπου  $E$  η ετήσια εξάτμιση ή ET σε mm,  $P$  η ετήσια κατακρήμνιση σε mm,  $I_T$  ή  $L = 300 + 25T + 0.05T^3$ ,  $T$  η μέση ετήσια θερμοκρασία σε °C

Εξίσωση που ενσωματώνει την επίδραση της μεταβλητότητας της εδαφικής υγρασίας:

$$E = \frac{P + E_{10} + K}{\left[ I + \left( \frac{P + E}{I_T} + \frac{K}{2I_T} \right) \right]^{0.5}}$$

όπου  $E$  η εξάτμιση σε mm για περίοδο 10 ημερών,  $E_{10}$  η εκτιμημένη εξάτμιση σε 10 ημέρες από γυμνό έδαφος υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει κατακρήμνιση (ή είναι μικρότερη των 10 mm), και  $K = 25(c \cdot M/G)^{0.5}$

$100M$  είναι η τελική απόδοση της ξηρής ύλης σε kg/ha,  $10G$  το μέγεθος της περιόδου ανάπτυξης σε μέρες και  $c$  συντελεστής καλλιέργειας

# Υπολογισμός Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής

## 1. Μέθοδος TURC (2)

$I_T$  η ικανότητα εξάτμισης του αέρα:

$$I_T = (T + 2)R_s^{0.5}/16$$

όπου  $T$  η μέση θερμοκρασία του αέρα για τη 10ήμερη περίοδο σε  $^{\circ}\text{C}$

$R_s$  η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε  $\text{cal}/\text{cm}^2$

Ο Turc υπολόγισε την ET για τις κλιματικές συνθήκες της Δυτικής Ευρώπης για 10ήμερες περιόδους:

$$ET = 0.013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50) \text{ για σχετική υγρασία } > 50\%$$

$$ET = 0.013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50) \left(1 + \frac{50-RH}{70}\right) \text{ για σχετική υγρασία } < 50\%$$

# Υπολογισμός Πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής

## 2. Μέθοδος Coutagne

**Μέθοδος Coutagne:** βασίζεται στα ίδια στοιχεία που βασίζεται και η TURC για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας τιμής της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής:

$$E = P \left( 1 - \frac{P}{I} \right)$$

όπου  $E$  και  $P$  όπως ορίστηκαν στην TURC και  $I$  συνάρτηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας:

$$I = 800 + 140T \text{ [mm]}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ισχύουν μόνο εφόσον  $\frac{I}{8} \leq P \leq \frac{I}{2}$

Για  $P \leq \frac{I}{8}$ , δεν υπάρχει απορροή:  $E = P$

Για  $P \geq \frac{I}{2}$ , το έλλειμμα ροής είναι ανεξάρτητο της βροχόπτωσης:  $E = \frac{I}{4} = 200 + 35T$