

Εξατμισοδιαπνοή

Μπαλτάς Ευάγγελος

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

**Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών
Πόρων**

ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ:

Εξατμισοδιαπνοή

➤ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

➤ ΦΥΣΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

➤ ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ

➤ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

- **Εξάτμιση:** Είναι το φαινόμενο μέσω του οποίου τα μόρια ενός σώματος μεταπίπτουν από την υγρή ή τη στερεά φάση, στην αέρια.
- **Διαπνοή:** Είναι η διαδικασία με την οποία τα φυτά χρησιμοποιούν το νερό για το μεταβολισμό και την ανάπτυξή τους. Ανάλογη διαδικασία με την εξάτμιση, με τη διαφορά ότι τα φυτά ελέγχουν την ποσότητα νερού που διαπνέεται ανοίγοντας και κλείνοντας τα στόματα του φυλλώματος.
- **Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή:** Η απευθείας εξάτμιση από το έδαφος και η διαπνοή γίνονται ταυτόχρονα στη φύση και είναι δύσκολο να διαχωριστούν οι υδρατμοί που παράγονται με τις δυο διεργασίες. Ως εκ τούτου, ο όρος εξατμισοδιαπνοή (evapotranspiration – *ET*) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συνολική διεργασία μεταφοράς νερού στην ατμόσφαιρα από φυτοκαλυμμένες επιφάνειες.
- **Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή:** Η ποσότητα εξατμισοδιαπνοής (potential evapotranspiration - *EPT* ή *PET*) που πραγματοποιείται σε πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες με χλωρίδα επιφάνειες, κάτω από συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι πάντα μικρότερη (συνήθως πολύ μικρότερη τους θερινούς μήνες) ή το πολύ ίση με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Εισαγωγικές έννοιες

Εξάτμιση (evaporation): η μετατροπή του νερού από την υγρή στην αέρια φάση

Ο ρυθμός εξάτμισης εξαρτάται από:

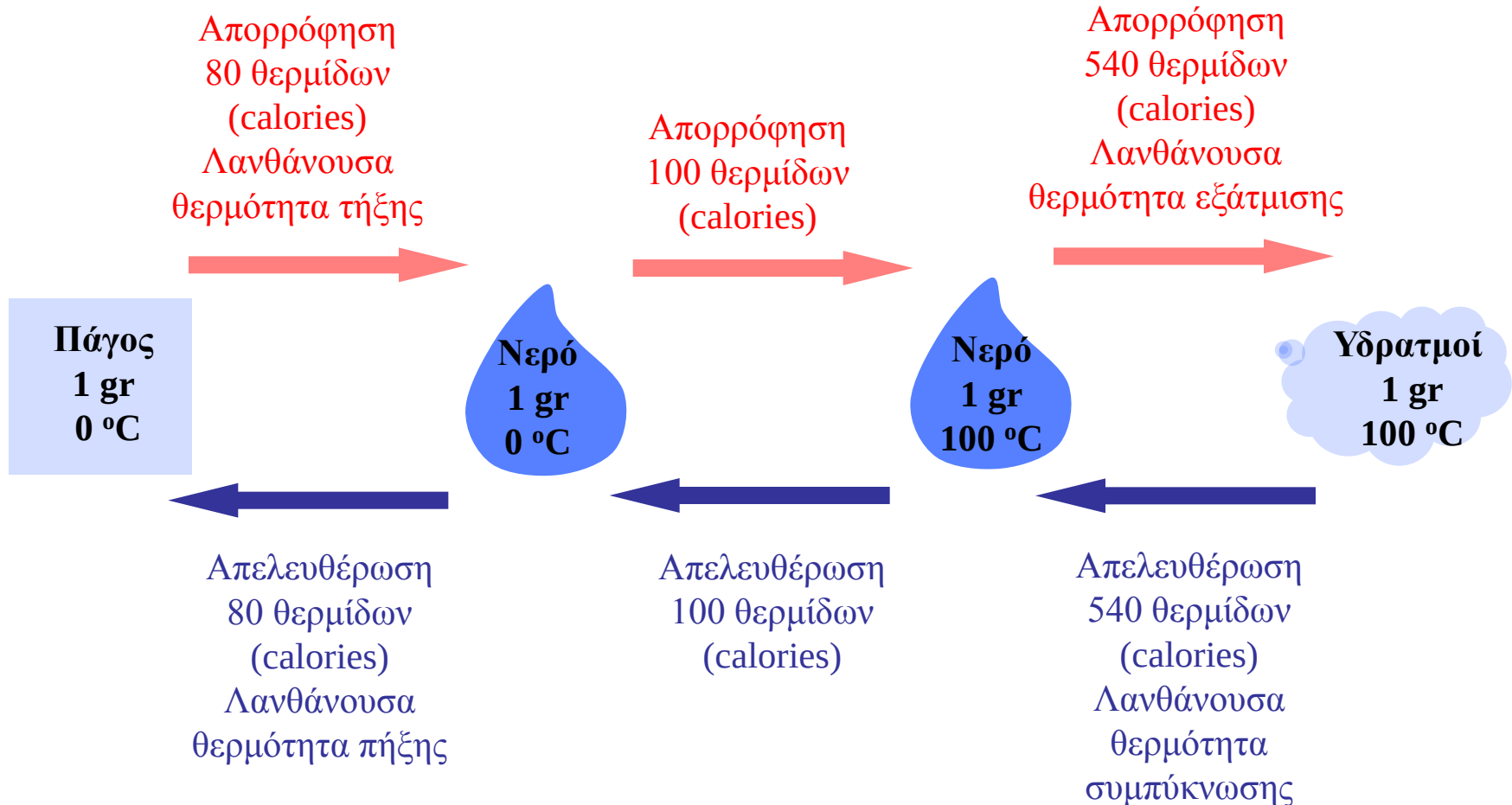
1. τη φυσική διαθεσιμότητα του νερού
2. τη διαθεσιμότητα ενέργειας στην επιφάνεια
3. τη δυνατότητα διάχυσης των παραγόμενων υδρατμών στην ατμόσφαιρα

Διαπνοή (transpiration): η μετατροπή του νερού σε υδρατμούς που πραγματοποιείται στους πόρους της χλωρίδας, και ιδίως των φυλλωμάτων των φυτών (έδαφος → ρίζες → αγγειακό σύστημα → πόροι φυλλωμάτων – στόματα).

Δεδομένου ότι ο ρυθμός διαπνοής ελέγχεται από τα φυτά μέσω της ρύθμισης του ανοίγματος των στομάτων, η διαπνοή ελαττώνεται όταν η διαθεσιμότητα νερού είναι μικρή και μηδενίζεται κατά τη διάρκεια της νύκτας όπου η διαδικασία της φωτοσύνθεσης διακόπτεται και τα στόματα κλείνουν.

Φυσικό πλαίσιο

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΦΑΣΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

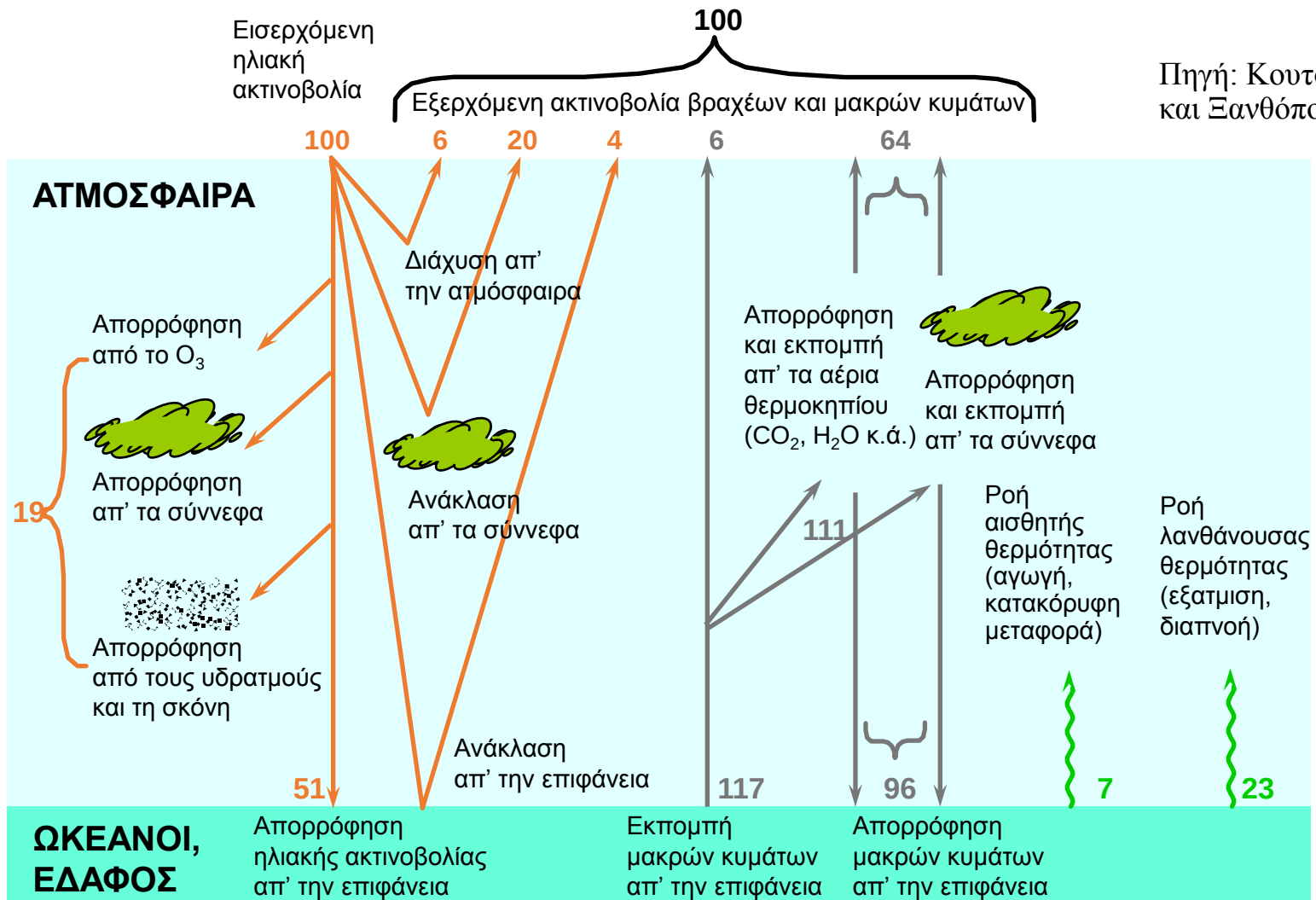


Ενεργειακό ισοζύγιο της γης

ΔΙΑΣΤΗΜΑ

◀ ΒΡΑΧΕΑ ΚΥΜΑΤΑ ▶

◀ ΜΑΚΡΑ ΚΥΜΑΤΑ ▶



Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999)

Φυσικές ιδιότητες νερού και υδρατμών

- Μια μάζα υδρατμών στην ατμόσφαιρα, όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία T και καταλαμβάνει όγκο V , ασκεί μερική πίεση e σύμφωνα με το νόμο του Dalton:

$$e \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

όπου:

e = η μερική πίεση υδρατμών

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

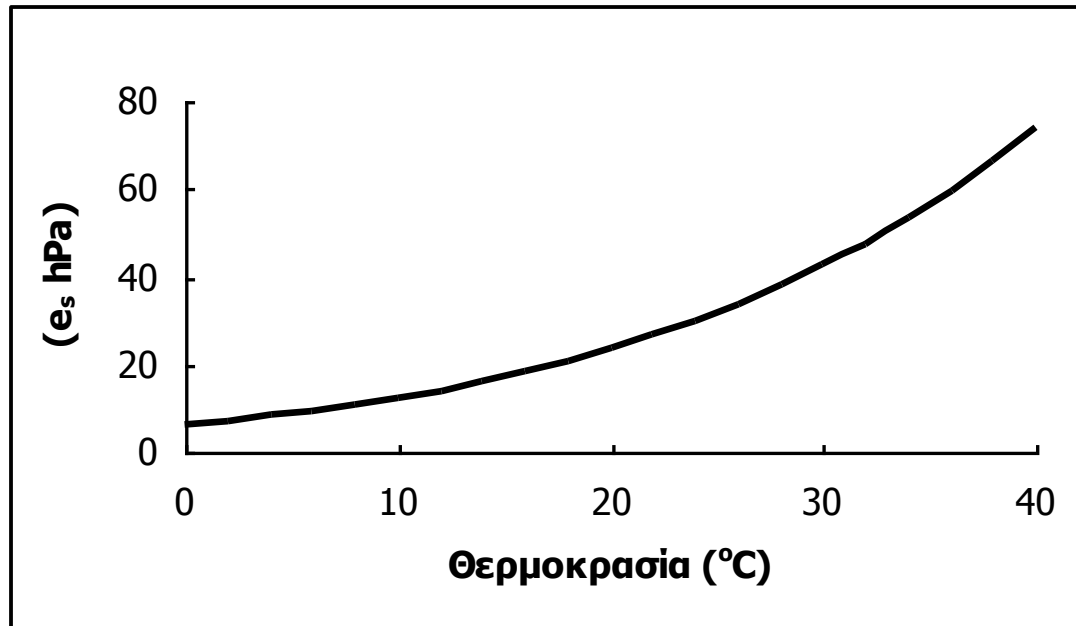
n = η μάζα των υδρατμών προς τη μάζα 1 γραμμομορίου υδρατμών (18 g)

R = παγκόσμια σταθερά των αερίων με τιμή $R = 8.31 \text{ Nm}/(^{\circ}\text{K Mole}) = 8.31 \text{ J}/(^{\circ}\text{K Mole}) = 0.0821 \text{ lt atm}/(^{\circ}\text{K mole})$

- Για κάθε θερμοκρασία, υπάρχει μια τιμή της πίεσης των υδρατμών, πάνω από την οποία αυτοί αρχίζουν να υγροποιούνται. Η πίεση αυτή λέγεται πίεση κορεσμού των υδρατμών e_s και δίνεται από την εξίσωση:

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

Η μεταβολή της πίεσης κορεσμού των υδρατμών με τη θερμοκρασία



- Κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών, Δ :

$$\frac{de_s}{d\theta} = \Delta = \frac{4098e_s}{(T + 237.3)^2} \quad [\text{hPa}/^\circ\text{C}]$$

- Σχετική υγρασία, U (συμβολίζεται και με RH [Relative Humidity]):

$$U = \frac{e}{e_s} \times 100\%$$

- Έλλειμμα κορεσμού υδρατμών, D :

$$D = e_s - e$$

- Λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, λ :

$$\lambda = 2501 - 2.361T_s \quad [\text{kJ/kg}]$$

(T_s η θερμοκρασία στην επιφάνεια του νερού σε $^\circ\text{C}$)

- Ψυχομετρικός συντελεστής, γ : (Τυπική τιμή του $\gamma = 0.67 \text{ hPa}/^\circ\text{C}$.)

$$\gamma = \frac{c_p \rho}{\varepsilon \cdot \lambda} = 1.63 \frac{\rho}{\lambda} \quad [\text{hPa}/^\circ\text{C}]$$

όπου:

c_p η ειδική θερμότητα του αέρα (για σταθερή πίεση) σε $[\text{kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})]$ με τυπική τιμή $c_p = 1.013 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$

ρ η ατμοσφαιρική πίεση $[\text{hPa}]$

$\varepsilon = 0.622$ ο λόγος μοριακών βαρών νερού και ξηρού αέρα

(1 mole υδρατμών/ 1 mole ξηρού αέρα = 18 g / 28.98 g = 0.622) και

λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης $[\text{kJ/kg}]$

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 (φ) $36^\circ - 46^\circ$ στο Βόρειο Ημισφαίριο

Μήνα Σ	Γεωγραφικό πλάτος φ ($^\circ$)					
	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 = $f_s \cdot S_0$

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

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

*τυπικές τιμές των παραμέτρων $a_s=0.25$ και $b_s=0.50$

n : πραγματικός αριθμός ωρών ηλιοφάνειας της ημέρας

N : θεωρητικός αριθμός ωρών της ημέρας (ώρες από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου). Λαμβάνεται από πίνακες συναρτήσεως του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής και του μήνα που εξετάζεται.

Μέσες μηνιαίες τιμές της αστρονομικής διάρκειας ημέρας N σε ώρες για γεωγραφικά πλάτη (ϕ) 36ο – 46ο στο Βόρειο Ημισφαίριο

Μήνα ς	Γεωγραφικό πλάτος ϕ (°)					
	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

- Ακτινοβολία του ηλίου στα όρια της ατμόσφαιρας και στο έδαφος → μικρού μήκους κύματος, **S (Short Wave = Βραχύ κύμα)**.
- Ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη γη όταν θερμαίνεται → ακτινοβολία μακρού μήκους κύματος, **L (Long Wave = Μακρύ κύμα)**.

Ακτινοβολία $f_s * S_0$

- 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 τυπική τιμή	0.04-0.10 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 τυπική τιμή για Ελλάδα	0.20-0.26 0.25
Παλιό χιόνι	0.35-0.65
Φρέσκο χιόνι	0.80-0.90

Νόμος θερμικής εκπομπής των Stefan-Boltzman

• Τα σώματα που διαθέτουν απόλυτη θερμοκρασία T [°K] εκπέμπουν ενέργεια Q , σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

όπου:

Q = ο ρυθμός εκπομπής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου

T = η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος που εκπέμπει

σ = παγκόσμια σταθερά, γνωστή ως σταθερά Stefan-Boltzman

ε = αδιάστατο μέγεθος γνωστό ως ικανότητα θερμικής εκπομπής (emissivity) που εξαρτάται από το υλικό του σώματος (για το ιδεατό μελανό σώμα, $\varepsilon=1$). Για το νερό $\varepsilon \approx 0.97$.

Καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων L_n

- Η διαφορά της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται μείον την ακτινοβολία που επιστρέφει.

όπου:
$$L_n = \varepsilon_n f_L \sigma (T_a + 273)^4 \quad [\text{kJ}/(\text{m}^2\text{d})]$$

- Ο αδιάστατος συντελεστής ε_n δίνεται από τον τύπο του Brunt:

$$\varepsilon_n = a_e - b_e \sqrt{e_a}$$

με τους συντελεστές κατά Penman $a_e = 0.56$, $b_e = 0.08$ και e_a [hPa] την μερική πίεση των υδρατμών της ατμόσφαιρας στη θερμοκρασία T_a

- Ο συντελεστής επίδρασης της νέφωσης (καθαρός αριθμός) δίνεται από την εξίσωση:

$$f_L = a_L + b_L \frac{n}{N}$$

με τους συντελεστές κατά Penman πάλι $a_L = 0.1$, $b_L = 0.9$

$$\sigma = 4.9 \times 10^{-6} \text{ kJ } / (\text{m}^2 \text{ K}^4 \text{ d})$$

- η σταθερά των Stefan – Boltzman και

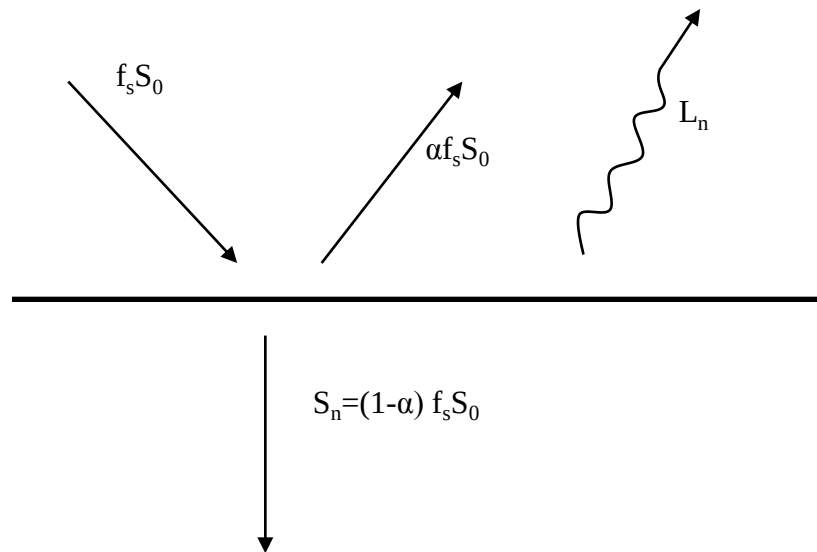
- T_a = η μέση θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}\text{C}$

Ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας, R_n

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

$$R_n = S_n - L_n$$

Ενεργειακό ισοζύγιο σε υδάτινη ή εδαφική επιφάνεια



Εξάτμιση

- Διαδικασία μεταφοράς νερού από γήινες και υδάτινες επιφάνειες προς την ατμόσφαιρα, με τη μορφή υδρατμών.
- Εξαρτάται κυρίως από:
 - την ηλιακή ακτινοβολία,
 - τη θερμοκρασία,
 - την πίεση των υδρατμών,
 - την ταχύτητα του ανέμου,
 - τη φύση της επιφάνειας εξάτμισης

Προσδιορισμός της εξάτμισης

1. Λεκάνη εξάτμισης και ατμόμετρο

(α) 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 **συντελεστής λεκάνης εξάτμισης**

(β) 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**

Προσδιορισμός της εξάτμισης

2. Μέθοδοι υδατικού ισοζυγίου

όπου $E = I + P - O - O_s + \Delta S$

- E είναι η εξάτμιση,
- I είναι η εισροή,
- P είναι η κατακρήμνιση,
- O είναι η εκροή,
- O_s είναι η διήθηση και
- ΔS είναι η μεταβολή στην αποθήκευση

Προσδιορισμός της εξάτμισης

3. Μέθοδοι ισοζυγίου ενέργειας

Ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης:

$$R_n = S_n - L_n$$

Η ποσότητα αυτή ενέργειας, μετατρέπεται σε:

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

$$R_n = H + \Lambda$$

Προσδιορισμός της εξάτμισης

4. Μέθοδοι μεταφοράς μάζας

Εξάτμιση ως μεταφορά μάζας ή διάχυση των υδρατμών από μεγαλύτερες προς μικρότερες συγκεντρώσεις

Νόμος διάχυσης του Fick:

$$\text{όπου: } E_a = -M \frac{de}{dz}$$

- E_a = ο ρυθμός εξάτμισης
- e = η μερική πίεση υδρατμών
- M = ο συντελεστής μεταφοράς και
- z = το τοπογραφικό υψόμετρο

Εμπειρική σχέση Dalton:

$$E_a = (e_s - e)F(u) = D \cdot F(u) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{d})]$$

όπου:

- $D = e_s - e$ [hPa] το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών
- $F(u)$ η συνάρτηση του ανέμου. Κατά Penman δίνεται από τη γραμμική εξίσωση:
$$F(u) = 0.26(1 + 0.54u) \quad [\text{hPa kg}/(\text{m}^2\text{d})]$$

(u είναι η ταχύτητα του ανέμου σε [m/s] μετρημένη σε ύψος 2 m από το έδαφος)

Προσδιορισμός της εξάτμισης

5. Μέθοδοι συνδυασμού – Η μέθοδος Penman

- Συνδυασμός μεθόδων ισοζυγίου ενέργειας με μεθόδους μεταφοράς μάζας.
- Εξάτμιση από υδάτινη επιφάνεια κατά Penman:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(u) D \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{d})]$$

όπου:

• γ = ο ψυχρομετρικός συντελεστής [$\text{hPa}/^\circ\text{C}$].

Τυπική τιμή = $0.67 \text{ hPa}/^\circ\text{C}$

• Δ = η κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών [$\text{hPa}/^\circ\text{C}$]

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237.3)^2}, \quad \text{όπου} \quad e_s = 6.11 e^{\frac{17.27T}{T + 237.3}}$$

• R_n = η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας [$\text{kJ}/(\text{m}^2\text{d})$]

$$R_n = S_n - L_n$$

• λ = η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης [kJ/kg]

$$\lambda = 2501 - 2.361 \cdot T$$

• $F(u)$ = η συνάρτηση ταχύτητας του ανέμου [$\text{kg}/(\text{hPa m}^2\text{d})$]

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

• D = το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών [hPa]

$$D = e_s - e = e_s - U \cdot e_s$$

Εξατμισοδιαπνοή

- Η εξατμισοδιαπνοή περιλαμβάνει τόσο τη διαπνοή από τη βλάστηση όσο και την εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες, το έδαφος, το χιόνι, τον πάγο και τη βλάστηση.

(α) Άμεση εκτίμηση (μέτρηση) της εξατμισοδιαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να μετρηθεί άμεσα με:

- (α) δεξαμενές,
- (β) λυσίμετρα και
- (γ) χρήση αγροτεμαχίων.

Εξατμισοδιαπνοή

(β) Έμμεση εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής

1. Μέθοδοι υδατικού ισοζυγίου

Όταν δεν υπάρχει άρδευση η εξατμισοδιαπνοή δίνεται από την εξίσωση:

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

όπου:

- P είναι η κατακρήμνιση,
- ΔSW η μεταβολή της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό,
- RO η επιφανειακή απορροή και
- D η βαθιά διήθηση.

- * Μειονεκτήματά της μεθόδου είναι η χαμηλού επιπέδου ακρίβεια των μετρήσεων και οι δυσκολίες εκτίμησης της ET στη διάρκεια των περιόδων βροχής.

Εξατμισοδιαπνοή

2. Μέθοδοι προσδιορισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από κλιματικά δεδομένα

2.1 Μέθοδος Penman - Monteith

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma'}{\Delta + \gamma'} F(u) D \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{d})]$$

όπου
• $\gamma' = (1 + 0.33u)\gamma$ [$\text{hPa}/^\circ\text{C}$] η τροποποιημένη έκφραση του ψυχομετρικού συντελεστή, ώστε να λαμβάνει υπόψη την αντίσταση των στομάτων. Η ταχύτητα ανέμου u δίνεται πάλι σε [m/s]

• $F(u) = \frac{90}{T + 275} u$ [$\text{kg}/(\text{hPa m}^2\text{d})$] η τροποποιημένη μορφή της συνάρτησης ανέμου με T πάλι σε [$^\circ\text{C}$] και u σε [m/s]

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

Εξατμισοδιαπνοή

2.2 Μέθοδος Thornthwaite

Σχέση για τη μηνιαία εξατμισοδιαπνοή με βάση τη μέση μηνιαία θερμοκρασία

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

όπου

- E_p , είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε $mm/μήνα$,
- t_i η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε $^{\circ}C$,
- μ ο αριθμός ημερών,
- N η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας,
- J ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας και
- a μια εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από το δείκτη J

Ο δείκτης θερμοκρασίας J , δίνεται από τη σχέση:

$$J = \sum_{i=1}^{12} j_i$$

Ο μηνιαίος δείκτης θερμοκρασίας j_i είναι συνάρτηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας κατά την εξίσωση:

$$j_i = 0.09 t_i^{3/2}$$

Μηνιαία ποσοστά ωρών ημέρας % των ωρών ημέρας του έτους

	Μήνας											
Β.Γεωγ · Πλάτο ς	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

Εξατμισοδιαπνοή

2.2 Μέθοδος Blaney - Criddle

Εμπειρική σχέση ανάμεσα στην εξατμισοδιαπνοή, τη μέση θερμοκρασία του αέρα και το μέσο ποσοστό ωρών ημέρας.

$$ET = kF = k \frac{(1.8T + 32)p}{3.94}$$

όπου

- ET είναι η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm ,
- k είναι ένας εμπειρικός συντελεστής που αναφέρεται στη συγκεκριμένη καλλιέργεια (συντελεστής καλλιέργειας),
- T η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα σε $^{\circ}C$ και
- p το ποσοστό ωρών ημέρας του μήνα (Πίνακας 3.4)

Εναλλακτικά το p δίνεται από τη σχέση: $p = 100 \frac{N \cdot \mu}{365 \cdot 12}$

όπου

- N η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας σε h και
- μ ο αριθμός ημερών του συγκεκριμένου μήνα.

- Τιμές εποχιακού φυτικού συντελεστή k
- Τιμές μηνιαίων φυτικών συντελεστών

Τιμές εποχιακού φυτικού συντελεστή K (σχέση Blaney –Criddle)

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

Σημείωση: Οι μικρότερες τιμές του K ισχύουν για παραθαλάσσιες περιοχές και οι μεγαλύτερες για περιοχές με ξηρό κλίμα.

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
Χλοστάπητας	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.	0.27	0.34	0.40	0.46	0.50	0.55	0.60	0.60	0.60	0.50	0.40	-
Πορτοκαλιά	Ενδιάμεση	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
“	Εσωτερική	-	-	0.13	0.30	0.55	0.84	0.98	0.88	0.60	0.37	0.20	-
Καρυδιά	Εσωτερική	-	-	0.10	0.27	0.42	0.52	0.57	0.55	0.35	0.15	-	-
Βοσκές	Εσωτερική, Υψηλή	-	-	0.16	0.45	0.65	0.75	0.78	0.74	0.55	0.20	-	-
“	Εσωτερική	-	-	-	0.45	0.80	0.95	0.90	-	-	-	-	-
Πατάτα	Εσωτερική, Ξηρή	-	-	-	-	-	0.40	1.00	0.85	0.70	-	-	-
Σόργον	Εσωτερική	-	-	-	0.31	0.69	0.96	1.01	0.83	-	-	-	-
Σακχαρότ.	Ενδιάμεση	-	-	-	-	0.40	0.67	0.76	0.70	0.50	0.29	-	-
“	Παραθαλ.	-	-	-	0.37	0.42	0.43	0.44	0.43	0.38	-	-	-
“	- - -	0.32	0.60	0.98	1.08	0.45	-	-	-	-	-	-	0.15
“	- - -	0.20	0.40	0.80	1.10	0.60	-	-	-	-	-	-	-
Κριθάρι	Εσωτερική, Ξηρή	-	-	-	-	0.41	0.74	0.93	0.98	0.89	-	-	-
Σιτάρι	Εσωτερική	-	-	-	0.23	0.49	0.67	0.78	0.78	0.64	0.40	-	-
Τομάτα	Παραθαλ.												
Λαχανικά													

Εξατμισοδιαπνοή

2.3 Μέθοδος Hargreaves

$$ET_p = MF(18T_a + 32)CH$$

όπου

- ET_p είναι σε $mm/μήνα$,
- MF είναι ένας μηνιαίος συντελεστής που εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος και δίνεται από πίνακες,
- T_a είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία (σε $^{\circ}C$) και
- CH είναι ένας διορθωτικός παράγοντας για τη σχετική υγρασία RH που χρησιμοποιείται μόνον όταν η μέση ημερήσια σχετική υγρασία ξεπερνά το 64%.

Το CH μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη εξίσωση:

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

- Για μέση ημερήσια $RH \leq 64\% \rightarrow CH = 1$

*Πολύ απλή μέθοδος και απαιτεί ελάχιστα κλιματικά δεδομένα

Μονάδες μέτρησης

- $1 \text{ joule} = 1 \text{ Nm} = 0.239 \text{ cal}$
- $1 \text{ ατμόσφαιρα} = 1013.25 \text{ mb} = 760 \text{ mm Hg} = 14.7 \text{ psi}$
- $1 \text{ εκτοπασκάλ (hPa)} = 100 \text{ Pa}$
- $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1000 \text{ hPa}$
- $\text{Βαθμοί Kelvin (}^\circ \text{K)} = T \text{ σε } ^\circ \text{C} + 273.16$

Εξίσωση Υδατικού Ισοζυγίου

$$P + Q_{SI} + Q_{GI} - E - Q_{SO} - Q_{GO} - \Delta_S - n = 0 \quad [L^3 \text{ ή } L^3T^{-1}]$$

όπου

- P είναι η κατακρήμνιση,
- Q_{SI} , Q_{GI} είναι η επιφανειακή και η υπόγεια εισροή αντίστοιχα
- E είναι η εξάτμιση (συμπεριλαμβάνοντας και τη διαπνοή)
- Q_{SO} , Q_{GO} είναι η επιφανειακή και η υπόγεια εκροή αντίστοιχα
- Δ_S είναι η μεταβολή της αποθηκευτικότητας
- n είναι διορθωτικός όρος

Ηλιακή ακτινοβολία

Άμεση –διάχυτη ακτινοβολία

Άμεση (direct)

Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης χωρίς να σκεδαστεί στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από:

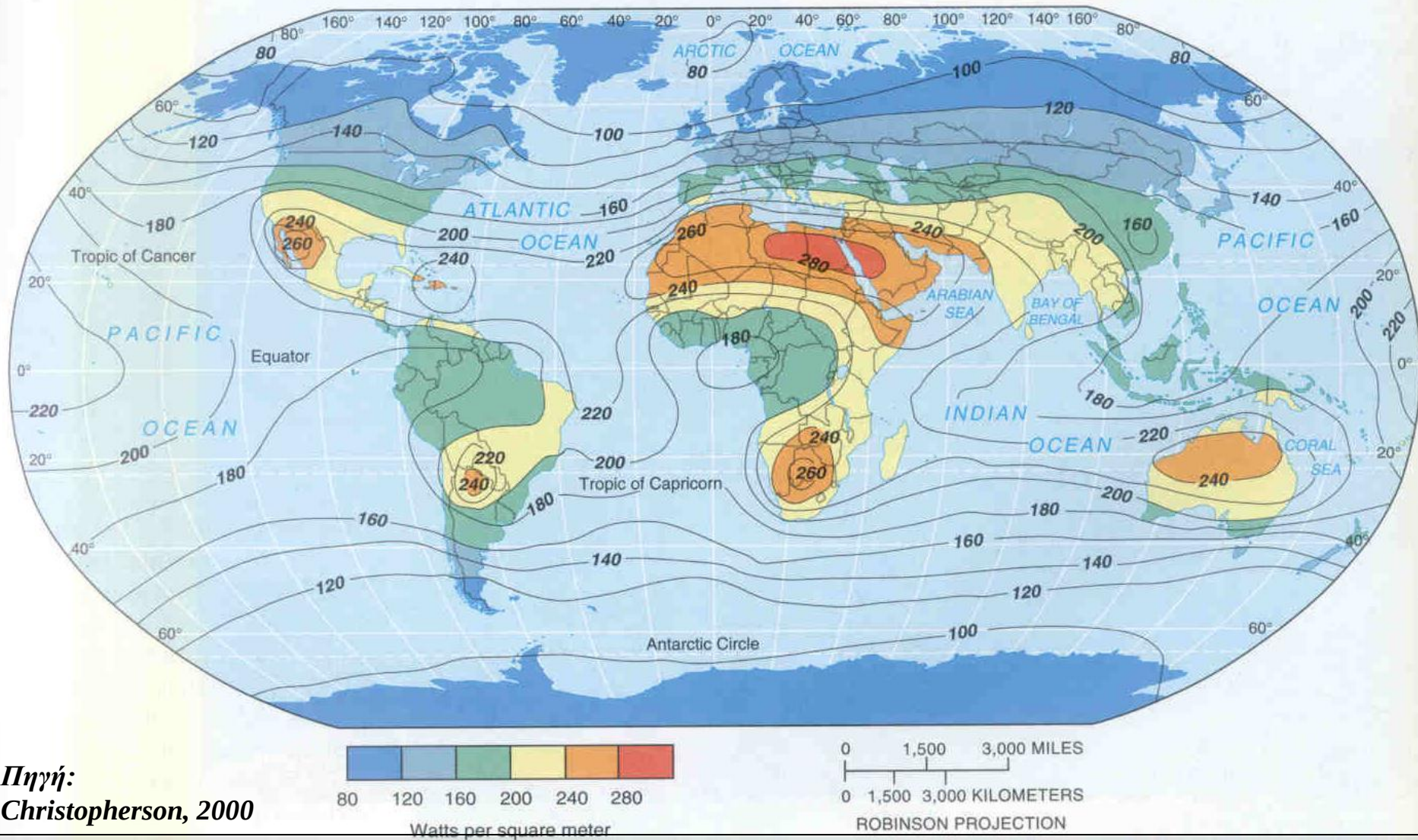
- την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα
- το ύψος του ηλίου
- την απόσταση του ηλίου
- το υψόμετρο της θέσης
- την κλίση της επιφάνειας

Διάχυτη (diffuse)

Η ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνση της από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Εξαρτάται από:

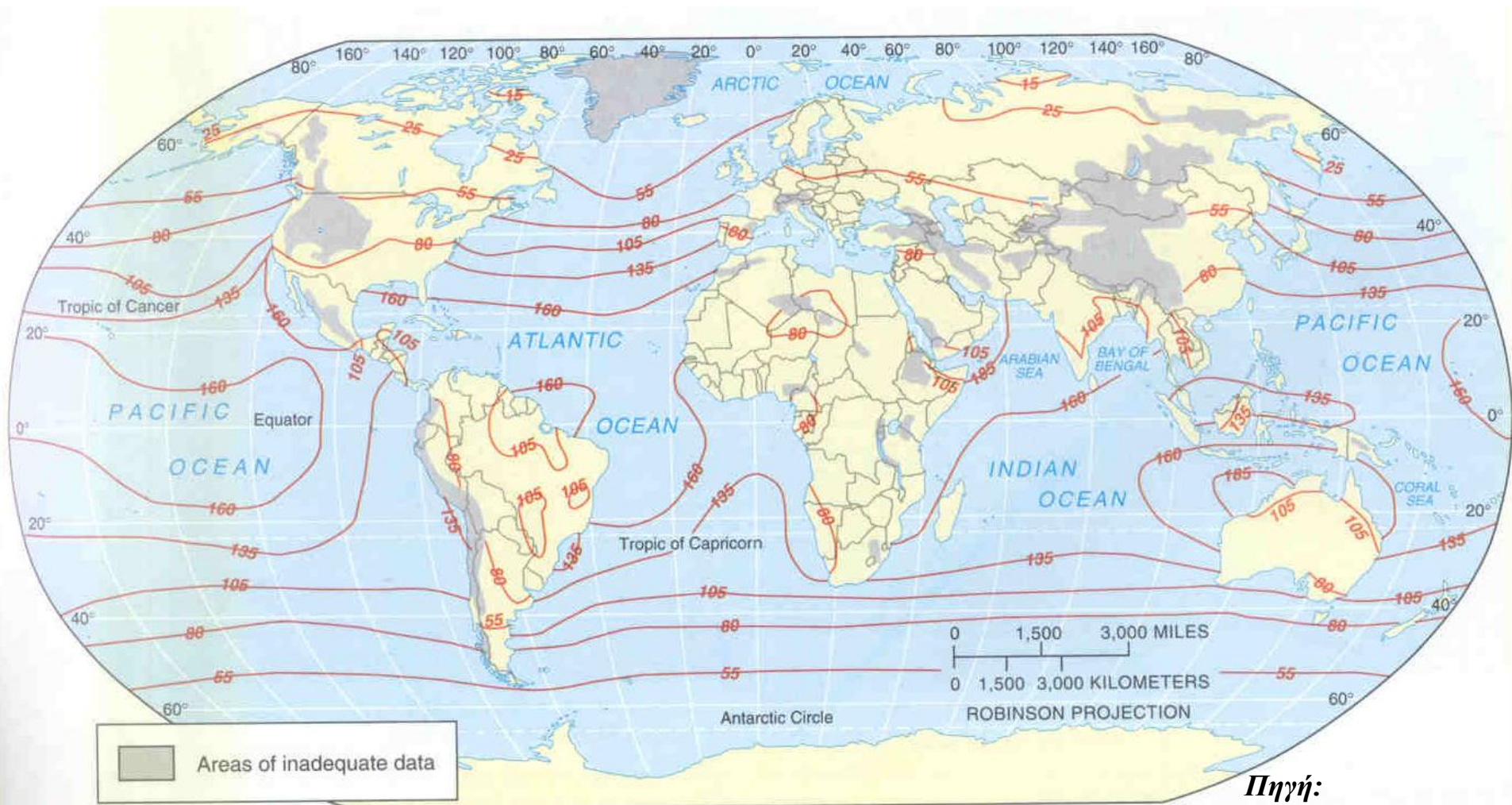
- την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα
- το ύψος του ηλίου
- το υψόμετρο της θέσης
- την ανακλαστικότητα του εδάφους
- το ποσό και το είδος των νεφών
- τη σύνθεση των σωματιδίων και των αερίων της ατμόσφαιρας

Μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο έδαφος (W/m^2)



Ε. Μπαλτάς, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων

Μέση ετήσια καθαρή ακτινοβολία στο έδαφος (W/m^2)



Πηγή:
Christopherson, 2000

Εξατμισόμετρο



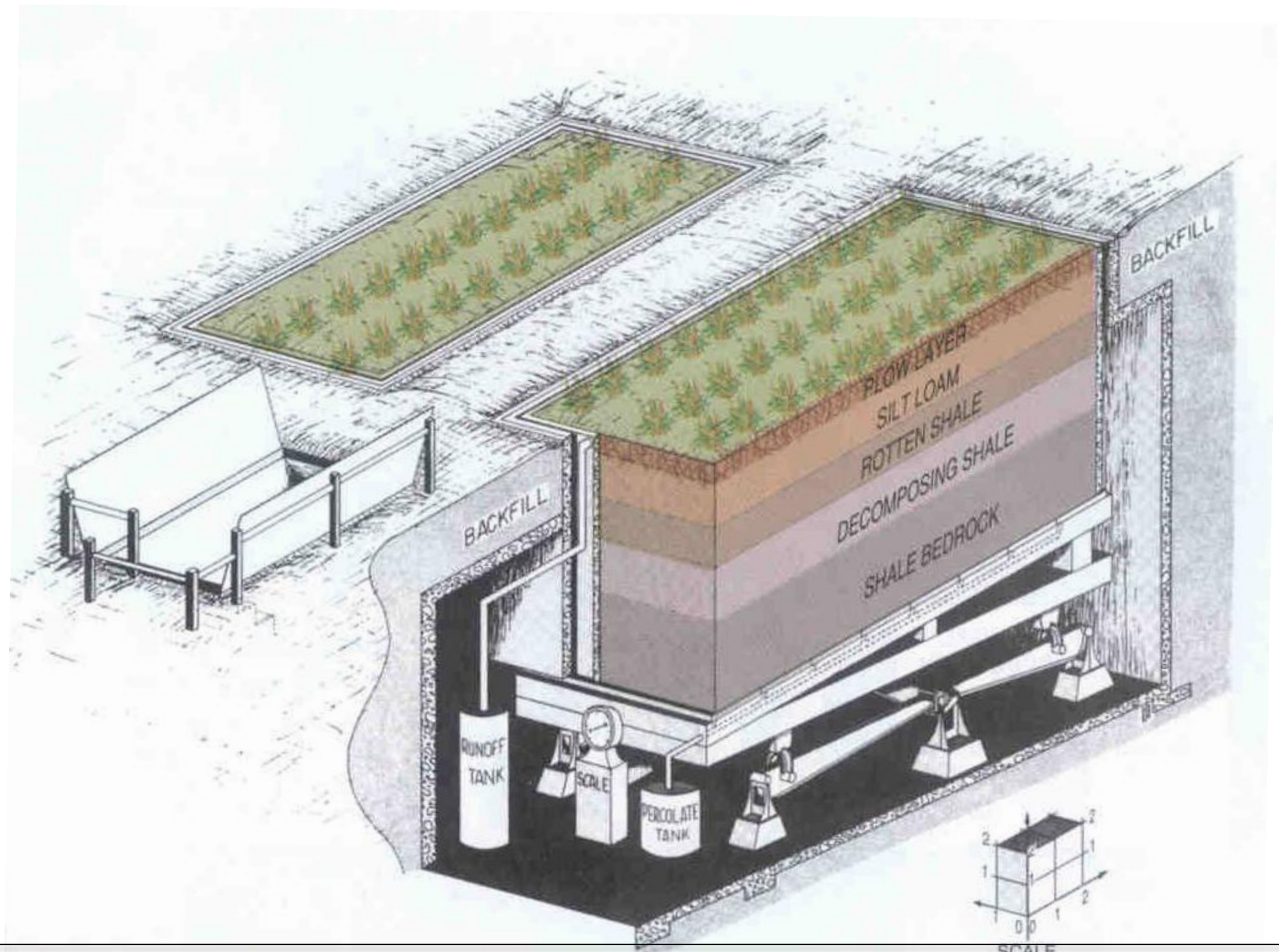
Ε. Μπαλτάς, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων

Εξατμισόμετρο



Ε. Μπαλτάς, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων

Λυσίμετρο



Ε. Μπαλτάς, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων

Υψομετρική μεταβολή της ταχύτητας ανέμου

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}} \quad \begin{array}{l} \text{όπου} \\ u_1, u_2 \text{ η ταχύτητα ανέμου σε ύψη } z_1 \text{ και } z_2 \text{ αντίστοιχα} \\ z_0 \text{ η παράμετρος τραχύτητας} \end{array}$$

**Τυπικές τιμές της παραμέτρου τραχύτητας z_0
για διάφορες φυσικές επιφάνειες (cm)**

Πάγος	0.001
Ασφαλτοστρωμένη επιφάνεια	0.002
Υδάτινη επιφάνεια	0.01-0.06
Χλόη ύψους μέχρι 1cm	0.1
Χλόη ύψους μέχρι 1-10 cm	0.1-0.2
Χλόη-σιτηρά κλπ ύψους 10-50 cm	2-5
Φυτοκάλυψη ύψους 1-2 m	20
Δένδρα ύψους 10-15 m	40-70