



Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ

Ενότητα 5: Εξατμισοδιαπνοή

Καθ. Αθανάσιος Λουκάς

Εργαστήριο Υδρολογίας και Ανάλυσης Υδατικών Συστημάτων

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πολυτεχνική Σχολή

ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΘΕΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΟΤΗΤΑΣ

ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

- ΕΙΣΑΓΩΓΗ
- ΦΥΣΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ
- ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ
- ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ
- ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

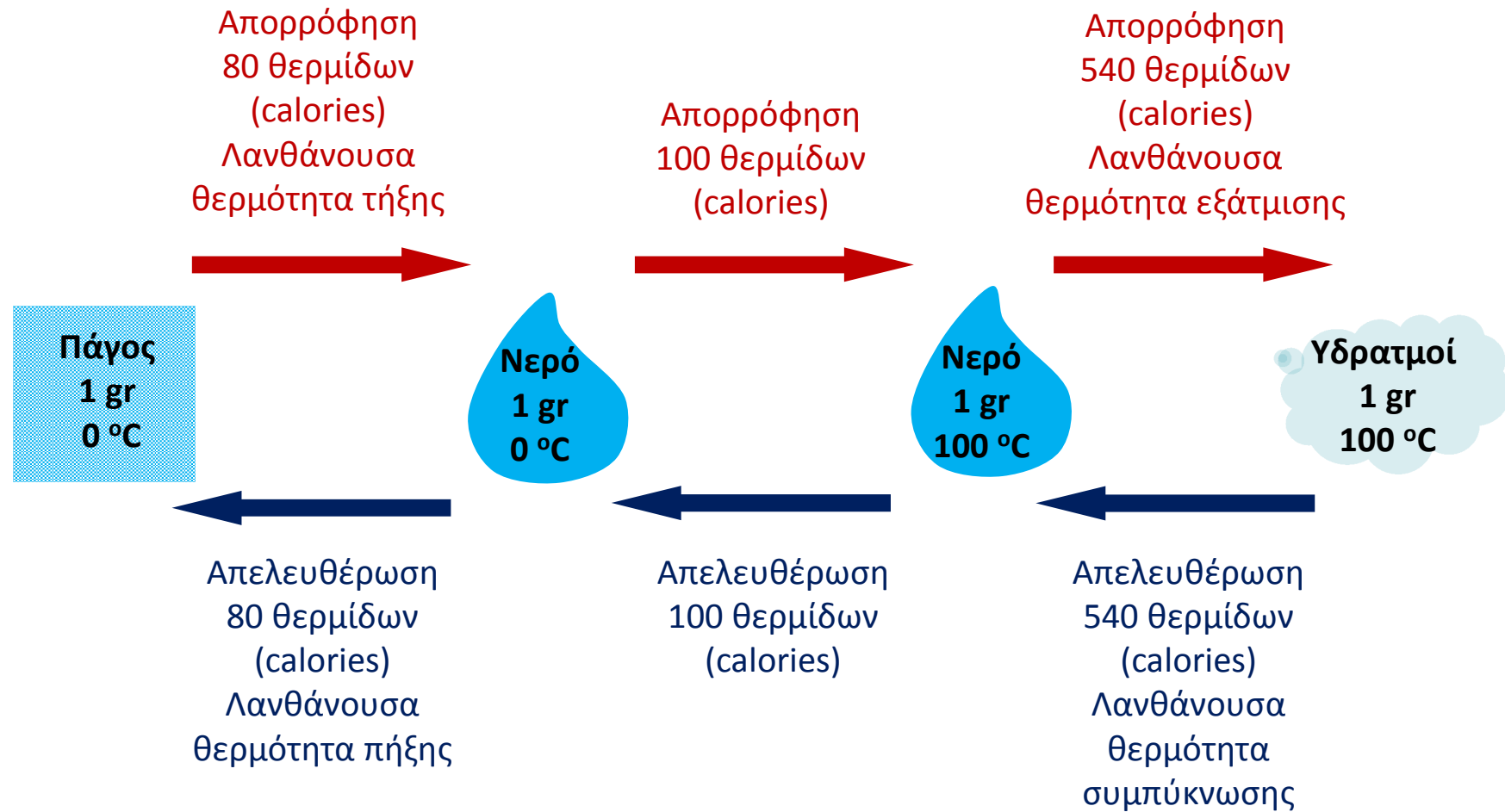


Εισαγωγικές έννοιες

- **Εξάτμιση (evaporation):** η μετατροπή του νερού από την υγρή στην αέρια φάση.
- **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).
- **Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή (actual evapotranspiration):** το σύνολο των πραγματικών απωλειών νερού από την εξάτμιση εδαφών και από τη διαπνοή της χλωρίδας.
- **Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (potential evapotranspiration):** η ποσότητα της εξατμισοδιαπνοής που πραγματοποιείται από εδαφικές επιφάνειες, πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες από αναπτυσσόμενη χλωρίδα, σε συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού.
- **Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (reference crop evapotranspiration):** η εξατμισοδιαπνοή από μια ιδεατή εκτεταμένη επιφάνεια καλυμμένη πλήρως από ομοιόμορφη χαμηλού ύψους χλόη που σκιάζει πλήρως το έδαφος και βρίσκεται σε συνθήκες ενεργού ανάπτυξης χωρίς έλλειψη νερού.



ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΦΑΣΗΣ ΣΤΟ ΝΕΡΟ

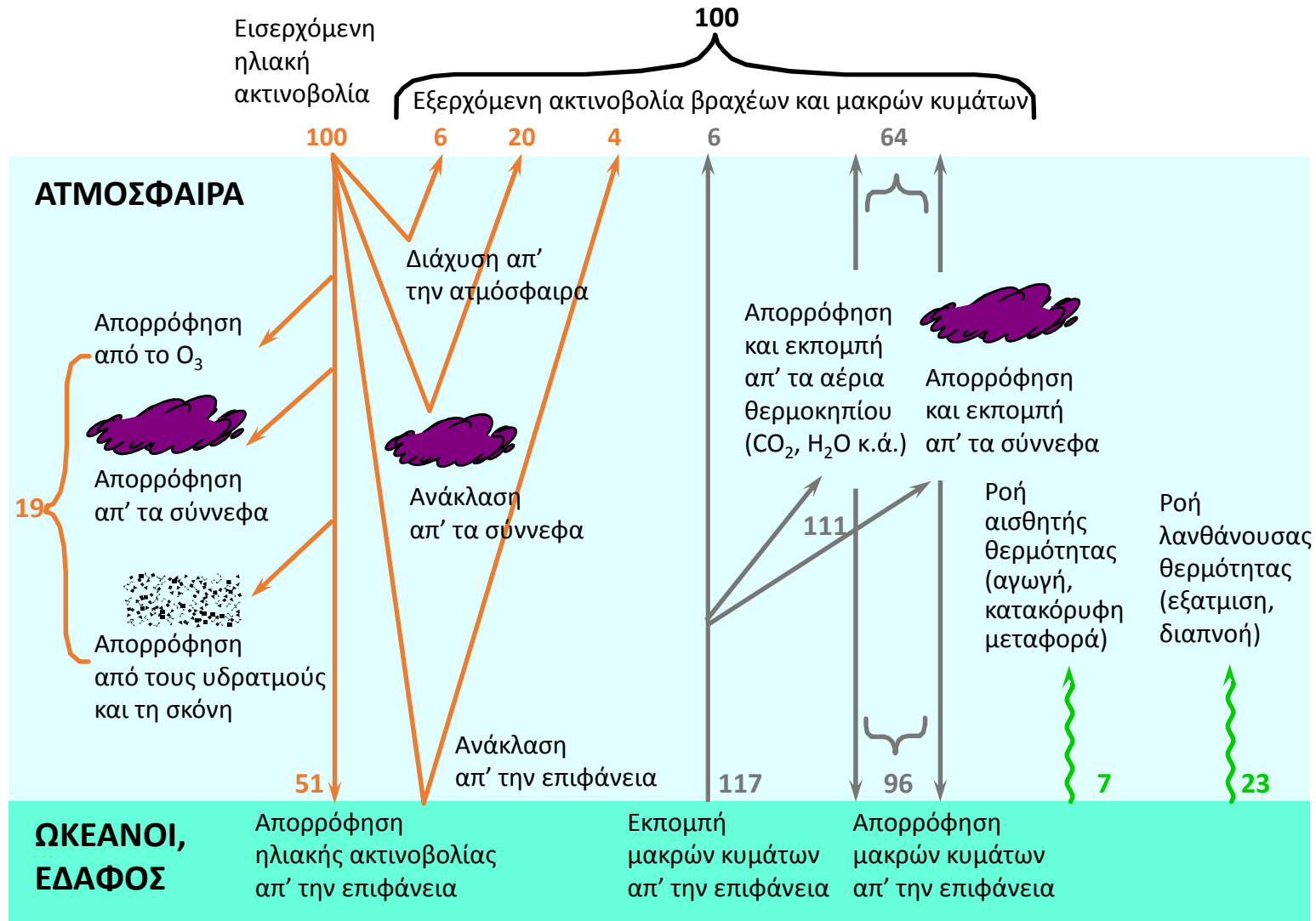


ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΗΣ ΓΗΣ

ΔΙΑΣΤΗΜΑ

← ΒΡΑΧΕΑ ΚΥΜΑΤΑ →

← ΜΑΚΡΑ ΚΥΜΑΤΑ →



Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος (1999)



- **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 $\gamma = 0.67 \text{ hPa}/^\circ\text{C}$)**

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

όπου:

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

P η ατμοσφαιρική πίεση $[\text{hPa}]$

$\varepsilon = 0.622$ ο λόγος μοριακών βαρών νερού και ξηρού αέρα (1 mole υδρατμών/ 1 mole ξηρού αέρα
= $18 \text{ g} / 28.98 \text{ g} = 0.622$) 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

	Γεωγραφικό πλάτος ϕ ($^\circ$)					
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:

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

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

n : πραγματικός αριθμός ωρών ηλιοφάνειας της ημέρας

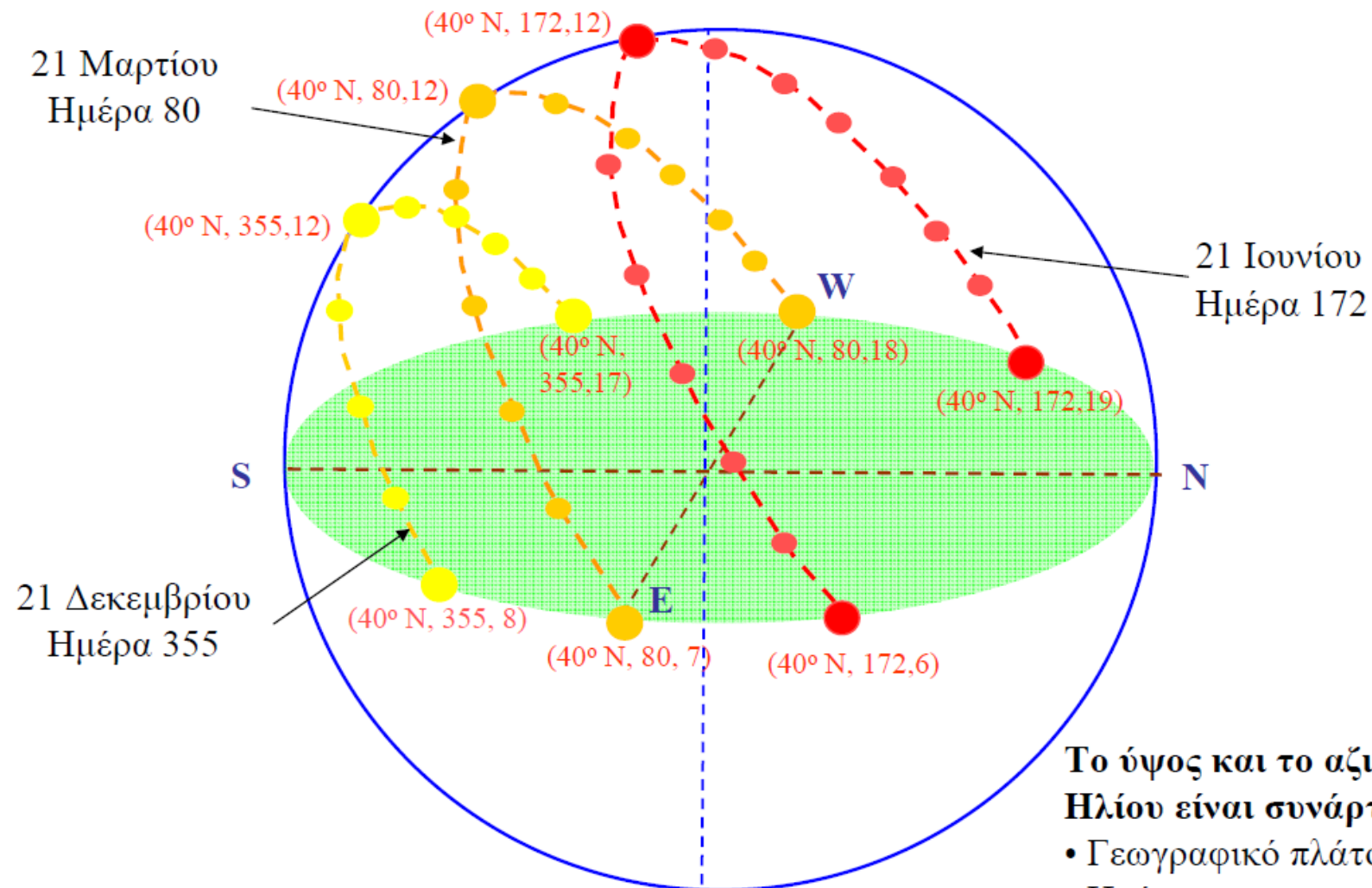
N : θεωρητικός αριθμός ωρών της ημέρας (ώρες από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου). Λαμβάνεται από πίνακες συναρτήσεως του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής και του μήνα που εξετάζεται.

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

Μήνας	Γεωγραφικό πλάτος ϕ ($^\circ$)					
	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
Μαΐ	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



ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΘΕΣΗΣ ΗΛΙΟΥ (γεωγραφικό πλάτος 40°)



Το ύψος και το αζιμούθιο του Ηλίου είναι συνάρτηση των

- Γεωγραφικό πλάτος
- Ημέρας
- Ωρας της ημέρας

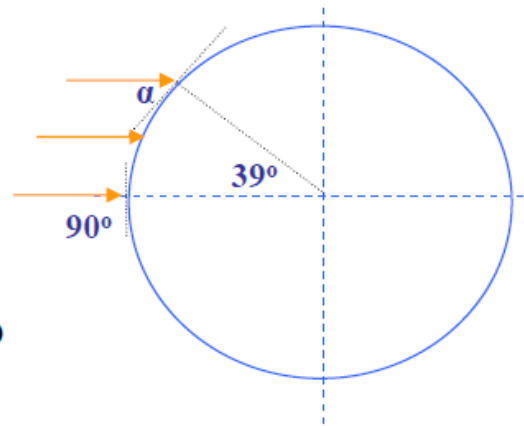
(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012. Εξαμνημοδιαπνοή http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/2012-13_Lektion3.pdf)



Γωνία πρόσπτωσης ηλιακών ακτινών το μεσημέρι, σε επίπεδη επιφάνεια και σε γεωγραφικό πλάτος 39°

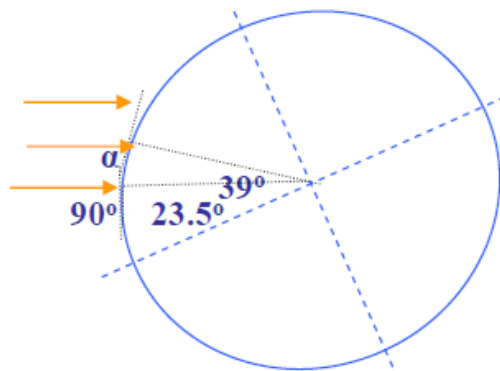
Ισημερίες

Γωνία πρόσπτωσης α :
 $90 - 39 = 51^\circ$



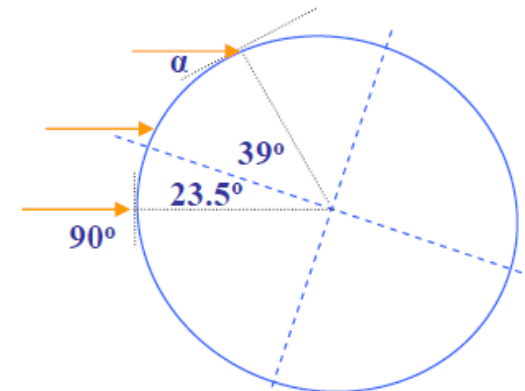
Θερινό ηλιοστάσιο

Γωνία πρόσπτωσης α :
 $90 - (39 - 23.5) = 73.5^\circ$



Χειμερινό ηλιοστάσιο

Γωνία πρόσπτωσης α :
 $90 - (39 + 23.5) = 27.5^\circ$



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012. Εξαμνησιοδιαπνοή http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/2012-13_Lektion3.pdf)



ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

- 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:

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

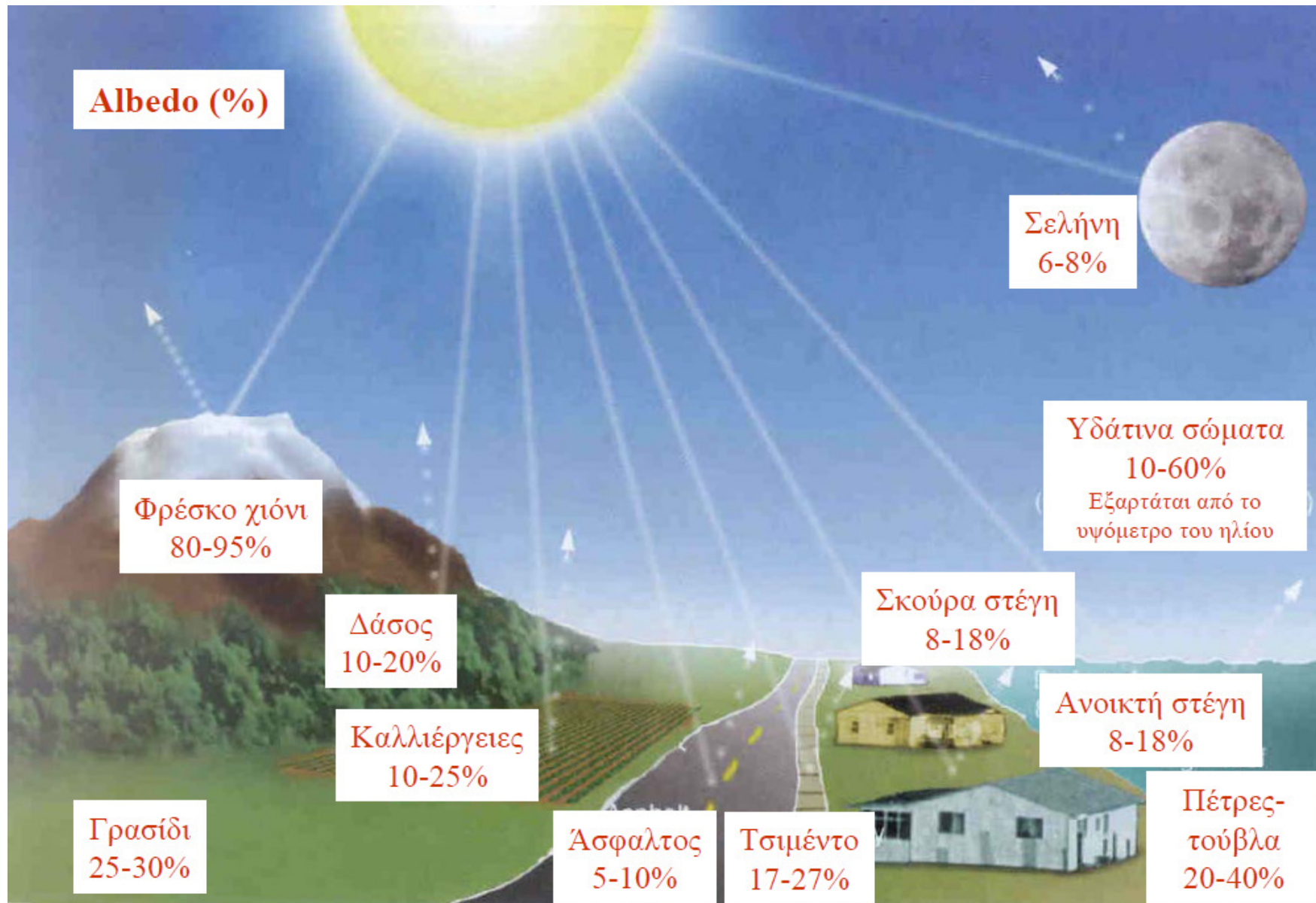
όπου α είναι ο βαθμός ανακλαστικότητας του εδάφους ή λευκαύγεια (*albedo*)

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



ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΝΑΚΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ALBEDO)



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012. Εξαμνησιοδιαπνοή http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/2012-13_Lektion3.pdf)

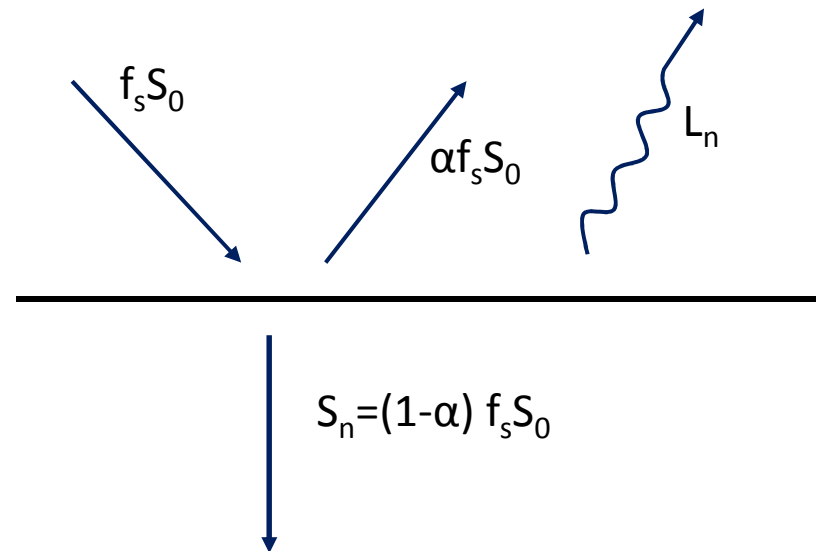


Ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας, R_n

- 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



ΕΞΑΤΜΙΣΗ

- 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**



Η μέτρηση της εξάτμισης

- Όργανο: εξατμισόμετρο
 - Διάφοροι τύποι λεκάνης, π.χ. λεκάνη τύπου A, λεκάνη τύπου Colorado, λεκάνη GGI-3000, λεκάνη 20 m² κτλ.
- Μετρούμενο μέγεθος: όχι η φυσική εξάτμιση E αλλά η προφανώς διαφοροποιημένη εξάτμιση από το εξατμισόμετρο E_m .
- Εκτίμηση της φυσικής εξάτμισης από υδάτινο σώμα ή της εξατμοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς

$$E = k E_m$$

όπου k ο συντελεστής εξατμισιμέτρου, κατά κανόνα μικρότερος από 1.

- Λόγω της αβεβαιότητας ως προς την τιμή του k και της συχνής αναξιοπιστίας των μετρήσεων του εξατμισιμέτρου, κατά κανόνα είναι προτιμότερη η εκτίμηση της εξάτμισης ή εξατμοδιαπνοής με εφαρμογή της μεθόδου Penman ή των τροποποιήσεών της.



Εξατμισόμετρο



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012.
Εξατμισοδιαπνοή http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/2012-13_Lektion3.pdf)



Εξατμισόμετρο



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012. Εξατμισοδιαπνοή http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/2012-13_Lektion3.pdf)



Προσδιορισμός της εξάτμισης (συν.)

2. Μέθοδοι υδατικού ισοζυγίου

$$E = I + P - O - Os + \Delta S$$

όπου

E είναι η εξάτμιση,

I είναι η εισροή,

P είναι η κατακρήμνιση,

O είναι η εκροή,

Os είναι η διήθηση και

ΔS είναι η μεταβολή στην αποθήκευση



Προσδιορισμός της εξάτμισης (συν.)

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 (συν.)

4. Μέθοδοι μεταφοράς μάζας

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

Νόμος διάχυσης του Fick:

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

όπου:

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 (συν.)

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 ψυχομετρικός 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]

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

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

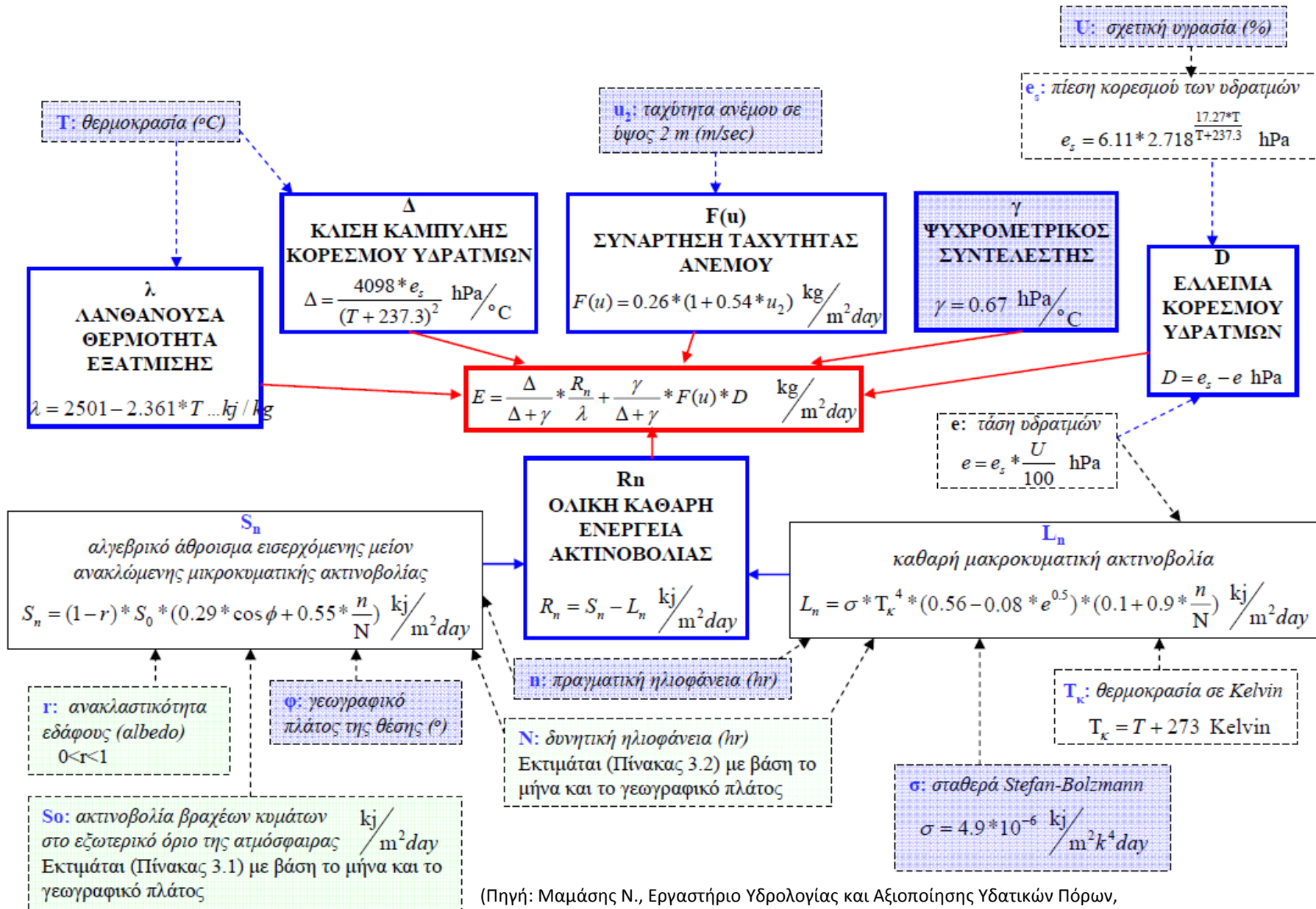
$$F(u) = 0.26 * (1 + 0.54 * u_2)$$

D = το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών [hPa]

$$D = e_s - e = e_s - U * e_s$$



ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ (E) ΚΑΤΑ ΠΕΝΜΑΝ



(Πηγή: Μαμάσης Ν., Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, <http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/penman.pdf>)



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.

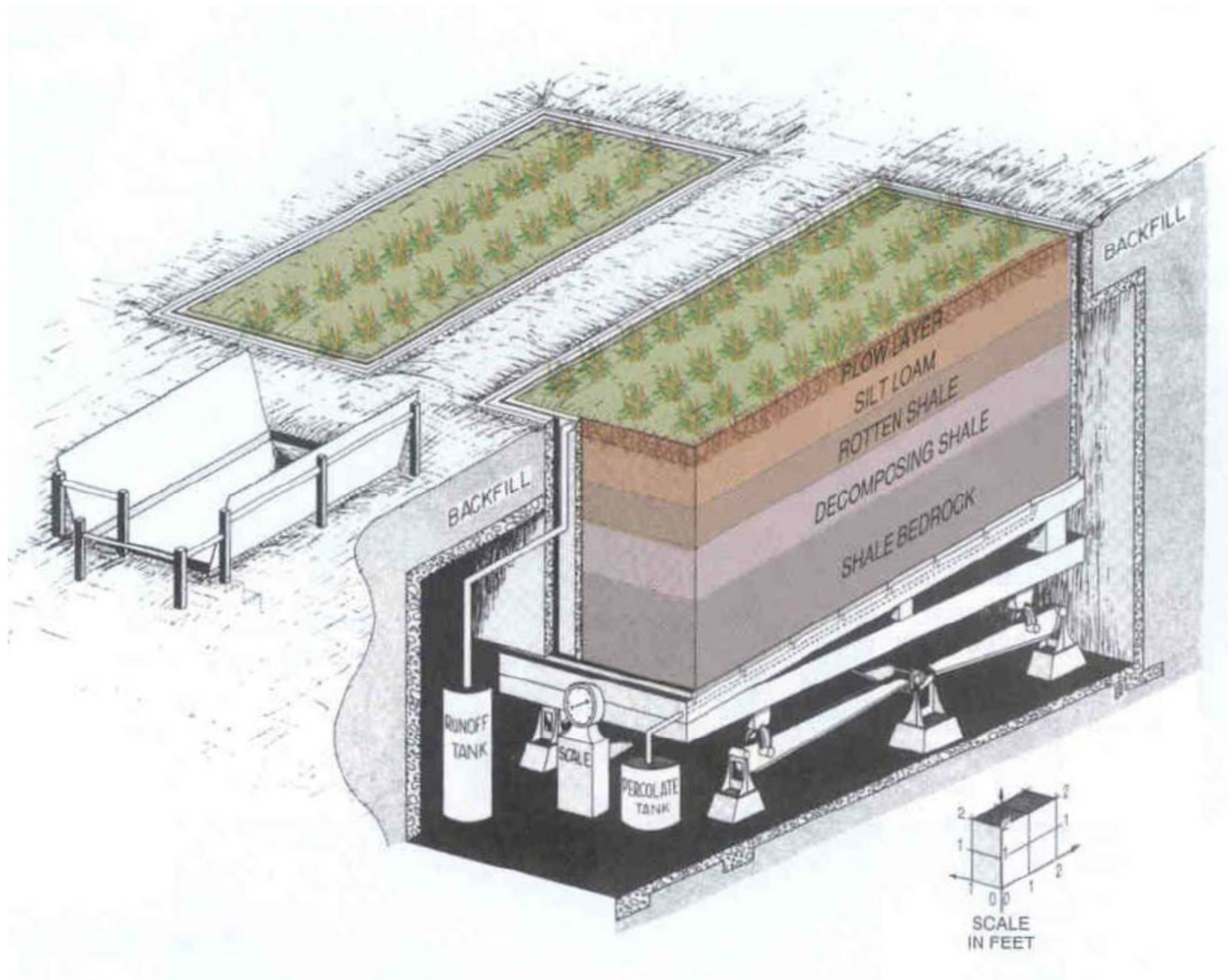
(α) Άμεση εκτίμηση (μέτρηση) της εξατμισοδιαπνοής

Η εξατμισοδιαπνοή μπορεί να μετρηθεί άμεσα με:

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



Λυσίμετρο



(Πηγή: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, 2012. Εξαμνησιοδιαπνοή http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/EduMaterial/2012-13_Lektion3.pdf)



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

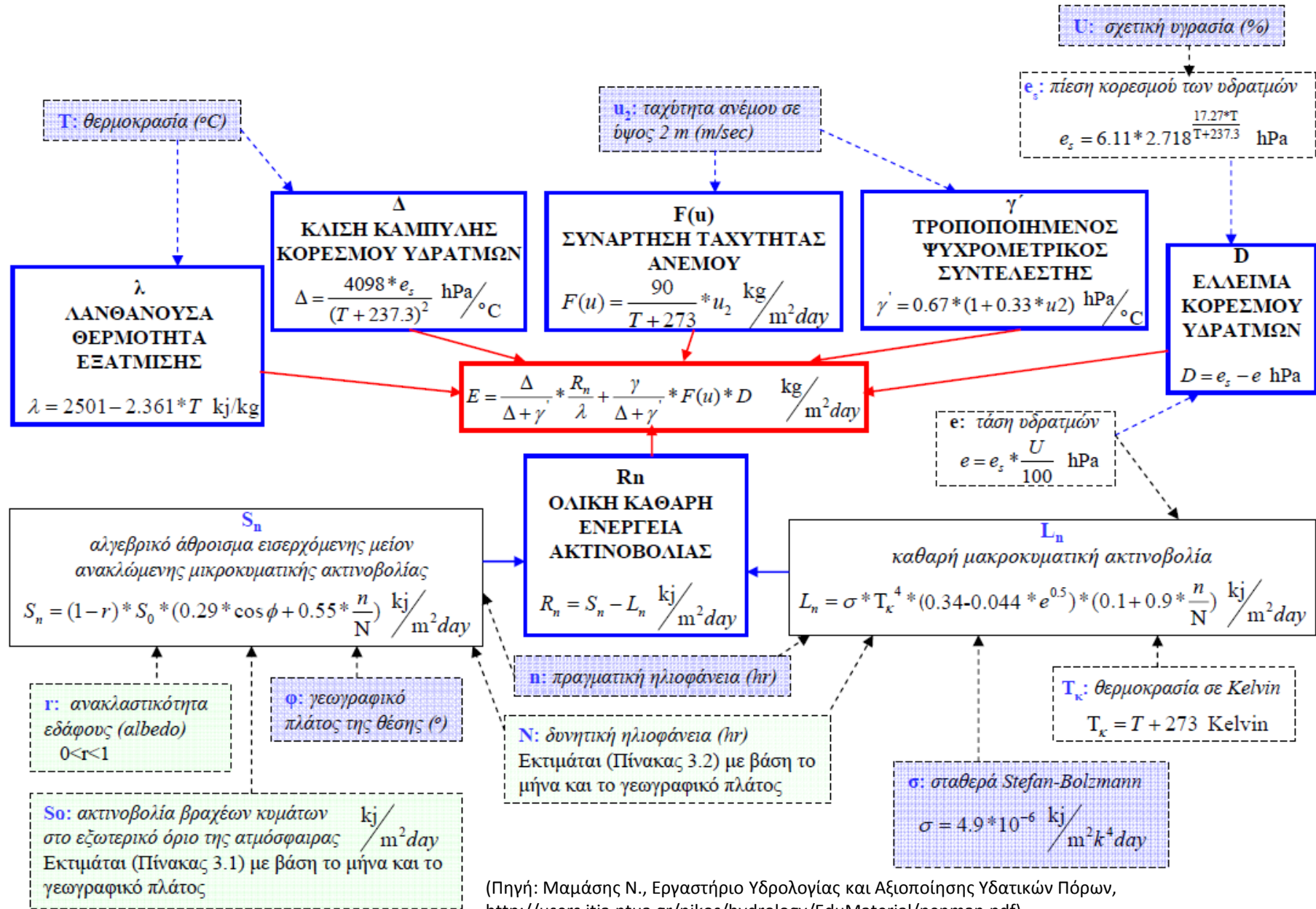
$\gamma' = (1 + 0.33u)\gamma$ [hPa/°C] η τροποποιημένη έκφραση του ψυχομετρικού συντελεστή, ώστε να λαμβάνει υπόψη την αντίσταση των στομάτων. Η ταχύτητα ανέμου u δίνεται πάλι σε [m/s]

$F(u) = \frac{90}{T + 275} u$ [kg/(hPa m²d)] η τροποποιημένη μορφή της συνάρτησης ανέμου με T πάλι σε [°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 .



ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ (E) ΚΑΤΑ PENMAN-MONTEITH



Εξατμισοδιαπνοή

FAO-56 Penman-Monteith

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u)} + \frac{900\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u)]} \cdot \frac{uD}{(T + 273)}$$

Δεδομένα που απαιτούνται για την εφαρμογή της FAO-56 Penman-Monteith (FAO56-PM) είναι:

- μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία, T_{max} , και T_{min} , αντίστοιχα;
- R_s = ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$);
- RH_{max} , RH_{min} μέγιστη και ελάχιστη σχετική υγρασία
- u = ταχύτητα ανέμου σε 2m ύψος (m/s)



Εξατμισοδιαπνοή

FAO-56 Penman-Monteith

Υψομετρική μεταβολή της ταχύτητας ανέμου

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}$$

όπου
 u_1, u_2 η ταχύτητα ανέμου σε ύψη z_1 και z_2 αντίστοιχα
 z_0 η παράμετρος τραχύτητας

**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



Εξατμισοδιαπνοή

Απλοποιημένες Εξισώσεις Penman-Monteith (Valiantzas, 2013)

Απλοποιημένη Εξίσωση - Δεδομένα(R_s, T, RH, u)

$$ET_o \approx 0.0393R_s \sqrt{T + 9.5} - 0.19R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.048(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) u^{0.7}$$

Απλοποιημένη Εξίσωση χωρίς ταχύτητα ανέμου- Δεδομένα(R_s, T, RH)

$$ET_o \approx 0.0393R_s \sqrt{T + 9.5} - 0.19R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.078(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right)$$

Απλοποιημένη Εξίσωση χωρίς ταχύτητα ανέμου και σχετική υγρασία - Δεδομένα(R_s, T)

$$ET_o \approx 0.0393R_s \sqrt{T + 9.5} - 0.19R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.0061(T + 20)(1.12T - T_{\min} - 2)^{0.7}$$

Valiantzas, J. (2013). "Simple ET_o Forms of Penman's Equation without Wind and/or Humidity Data. I: Theoretical Development." *J. Irrig. Drain Eng.*, 139(1), 1–8.



Εξατμισοδιαπνοή

2.2 Μέθοδος Thornthwaite

Σχέση για τη μηνιαία εξατμισοδιαπνοή με βάση τη μέση μηνιαία θερμοκρασία

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

όπου

E_p , είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε $mm/\mu\eta\text{να}$,

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

μ ο αριθμός ημερών,

N η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας,

J ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας και

α 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:

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



Εξατμισοδιαπνοή

Μέθοδος Thornthwaite

Ο Thornthwaite (1948) περιέγραψε τη βιολογική και φυσική σημασία της εξατμισοδιαπνοής στην κλιματική ταξινόμηση και ανέπτυξε μια εξίσωση για την εκτίμηση της δυνατής εξατμισοδιαπνοής :

$$PET = 16 L_d (10 T / I)^\alpha \quad (\text{σε mm})$$

όπου, T η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης απορροής σε °C, I ο δείκτης θερμότητας που δίνεται από την σχέση:

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left(\frac{T_n}{5} \right)^{1.514}$$

όπου, T_n η κανονική θερμοκρασία κάθε μήνα, L_d ένας διορθωτικός συντελεστής που υπολογίζεται από μετεωρολογικούς πίνακες ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους και α ένας συντελεστής που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = 0.000000675 * I^3 - 0.000077 * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239$$



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 $k \rightarrow$ Πίνακας 3.7
- Τιμές μηνιαίων φυτικών συντελεστών \rightarrow Πίνακας 3.8



Μηνιαία ποσοστά ωρών ημέρας % των ωρών ημέρας του έτους (Πίνακας 3.4)

Β.Γεωγ. Πλάτος	Μήνας											
	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



Τιμές εποχιακού φυτικού συντελεστή K (σχέση Blaney – Criddle) (Πίνακας 3.7)

ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	Διάρκεια Βλαστικής Περιόδου σε μήνες	K
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

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) (Πίνακας 3.8)**

Καλλιέργ.	Περιοχή	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	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
Χλοτάπητας	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	0.53	0.54	0.54	0.52	0.48	0.43	0.30
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.	Εσωτερική	-	-	-	-	0.40	0.67	0.76	0.70	0.50	0.29	-	-
“	Ενδιάμεση	-	-	-	0.37	0.42	0.43	0.44	0.43	0.38	-	-	-
“	Παραθαλ.	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



Εξατμισοδιαπνοή

2.4 Μέθοδος Turc (Θερμοκρασία – ακτινοβολία)

Η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τη μέθοδο Turc (1954) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_p = \frac{P + 80}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + 45}{L^{Tc}}\right)^2}}$$

όπου, P η μηνιαία βροχόπτωση σε mm, T η μέση θερμοκρασία της λεκάνης σε °C,

$$L^{Tc} = \frac{(T + 2) \sqrt{H_{sh}}}{16}$$

H_{sh} η προσπίπτουσα ακτινοβολία στην επιφάνεια της Γης σε $\text{cal cm}^{-2} \text{day}^{-1}$ που υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$H_{sh} = H_{sh}^{top} (a + bn / N)$$

όπου H_{sh}^{top} η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας, το οποίο υπολογίζεται από μετεωρολογικούς πίνακες ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους για περίοδο δέκα ημερών.

Στην παραπάνω σχέση τα a και b είναι εμπειρικές σταθερές που σύμφωνα με τον Koormanis (Shuttleworth, 1993) παίρνουν τις τιμές: a = 0.20 και b = 0.53 για εύκρατα κλίματα και a = 0.28 και b = 0.45 για τροπικά. Το n είναι η πραγματική διάρκεια των ωρών λαμπρής ηλιοφάνειας, ενώ το N είναι η μέγιστη δυνατή διάρκεια των ωρών λαμπρής ηλιοφάνειας τα οποία υπολογίζονται από μετεωρολογικούς πίνακες ως συνάρτηση του μήνα και του γεωγραφικού πλάτους για περίοδο δέκα ημερών.



Εξατμισοδιαπνοή

2.5 Μέθοδος Jensen – Haise (θερμοκρασία – ακτινοβολία)

- Η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή σύμφωνα με τη μέθοδο Jensen- Haise (1963) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_p = (0.025T + 0.008) H_{sh} / 59$$

όπου, H_{sh} η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε $\text{cal cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$, T η μέση μηνιαία θερμοκρασία της λεκάνης σε $^{\circ}\text{C}$.

- Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν από τον Turc (1954) και τους Jensen-Haise (1963) υπολογίζουν μικρότερες τιμές από τις πραγματικές τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής κατά την διάρκεια της άνοιξης και μεγαλύτερες κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Η ανακολουθία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι οι δύο μέθοδοι υπερεκτιμούν την επίδραση της θερμοκρασίας σε σχέση με την επίδραση της ακτινοβολίας.



Βιβλιογραφία

Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. 2012. «Εξατμισοδιαπνοή», Διαφάνειες του μαθήματος «Τεχνική Υδρολογία»
<http://users.itia.ntua.gr/nikos/hydrology/>

Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος. «Τεχνική Υδρολογία», Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.

Μιμίκου, Μ.Α. και Ε.Α. Μπαλτάς. «Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 5^η Έκδοση, 2012.

Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. «Τεχνική Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων», Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούδη, 2001.

Τσακίρης, Γ. «Υδατικοί Πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία», Εκδόσεις Συμμετρία, 1995.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

