



Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πολυτεχνική Σχολή
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

Σημειώσεις μαθήματος **ENE2310: Τεχνική Υδρολογία**

Διάλεξη 5
01/04/2022

Βασιλική Συγγούνα
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
Πανεπιστήμιο Πατρών

Εξατμισοδιαπνοή (ET)

Ορισμοί

Εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration, ET) είναι το σύνολο των διαδικασιών μέσω των οποίων γίνεται μετατροπή νερού από υγρή ή στερεά φάση σε υδρατμούς.

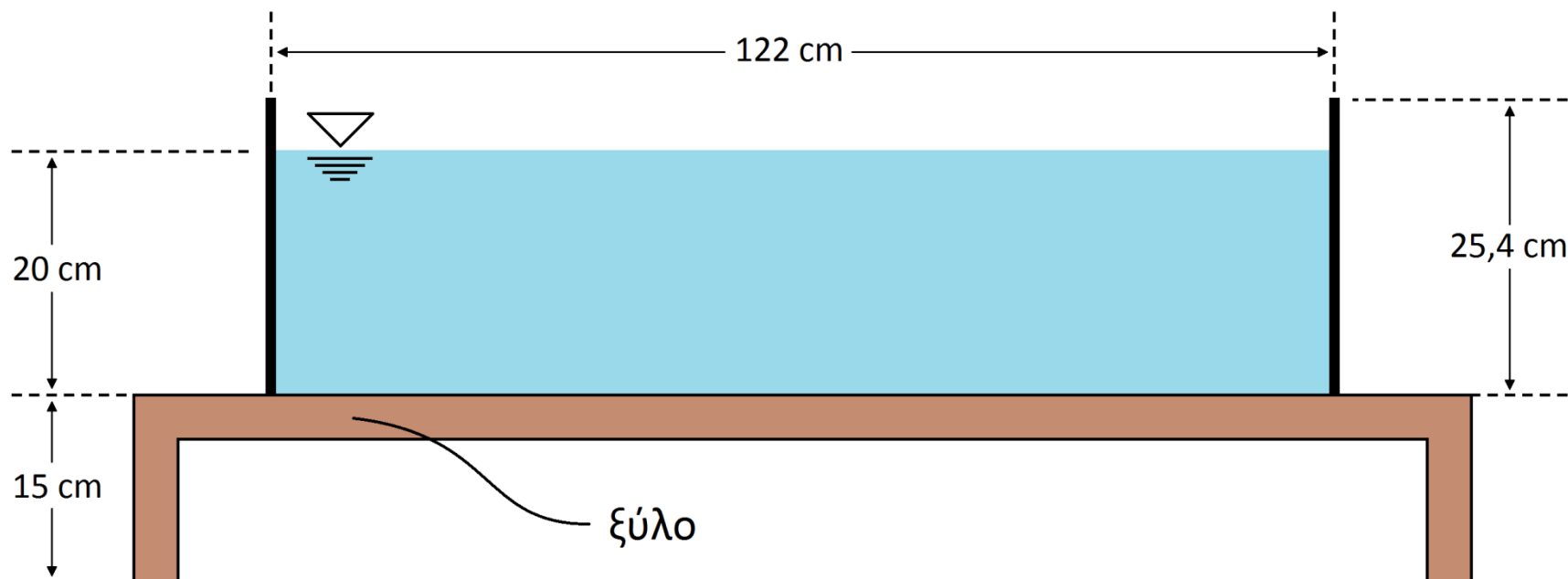
- **Εξάτμιση** (Evaporation): Είναι η μετατροπή της υγρής φάσης του νερού σε υδρατμούς από υδάτινη επιφάνεια και από την επιφάνεια του εδάφους ή βλάστησης.
- **Διαπνοή** των φυτών (Transpiration): Μετατροπή της υγρής φάσης του νερού σε υδρατμούς από το φύλλωμα της βλάστησης των φυτών.
- **Εξάχνωση** (Sublimation): Μετατροπή της στερεάς φάσης του νερού σε υδρατμούς (από επιφάνεια πάγου ή χιονιού).

Η ET εξαρτάται από:

- Τη διαθέσιμη ποσότητα νερού προς εξάτμιση.
- Τη διαθέσιμη ποσότητα ενέργειας (ακτινοβολία ή θερμότητα).
- Το είδος της επιφάνειας (υδάτινη επιφάνεια, γυμνό έδαφος, βλάστηση κτλ).
- Την κατανομή της υγρασίας και της ταχύτητας του ανέμου.

Εξάτμιση

Η μέτρηση της εξάτμισης γίνεται με **Λεκάνη εξάτμισης**



- Όταν το βάθος του νερού πέσει κάτω από 18 cm τότε αναπληρώνεται.
- Η εξάτμιση από μικρές επιφάνειές είναι μεγαλύτερη, γι' αυτό η τιμή πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή (0,6 - 0,8).

Εξισώσεις υπολογισμού της εξάτμισης

Εξίσωση τύπου Dalton, γενική μορφή

$$E = k f(u)(e_s - e_a)$$

όπου k : συντελεστής (1 mb=1000dyn/cm²=100Pa)
 $f(u)$: συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου u
 e_s : η μέγιστη τάση υδρατμών στη θερμοκρασία της επιφάνειας του νερού (mb)
 e_a : η πραγματική τάση υδρατμών της ατμόσφαιρας (mb) σε ύψος α μέτρων *

Εξίσωση Harbek (ημερήσια βάση)

$$E = 1,46 \times 10^{-4} A^{-0,05} u_2 (e_s - e_2)$$

όπου E : η εξάτμιση (cm/day)
 A : η έκταση της υδάτινης επιφάνειας (km²)
 u_2 : η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m από την υδάτινη επιφάνεια (cm/s)
 $e_s - e_2$: η διαφορά τάσης υδρατμών (mb, millibars)

* Επίσης για τη σχετική υγρασία h_r ισχύει ότι:

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

Εξισώσεις υπολογισμού της εξάτμισης

Εξίσωση Meyer (μηνιαία βάση)

$$E = C \left(1 + \frac{u_9}{16} \right) (e_s - e_a)$$

όπου E : η εξάτμιση (mm/month)

C : συντελεστής

= 11,25 (μικρές μάζες νερού)

= 8,25 (μεγάλες μάζες νερού)

u_9 : η μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 9m (km/h)

e_s : η μέγιστη τάση υδρατμών (mb) σε σχέση με:

τη μέση θερμοκρασία του αέρα για μικρές μάζες νερού

τη μέση θερμοκρασία του νερού για μεγάλες μάζες νερού

e_a : η πραγματική τάση υδρατμών της ατμόσφαιρας (mb)

Εξάτμιση

Παράδειγμα 1

Να υπολογιστεί το ύψος της εξάτμισης από ταμιευτήρα του οποίου η επιφάνεια έχει εμβαδόν 5 km^2 για 1 ημέρα όταν η θερμοκρασία του αέρα είναι $23,9^\circ\text{C}$, η σχετική υγρασία είναι $h_r = 68,8\%$ και η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 2m είναι $2,76 \text{ km/h}$.

Λύση

Θα κάνουμε χρήση της εξίσωσης Harbek

$$E = 1,46 \times 10^{-4} A^{-0,05} u_2 (e_s - e_2) \quad (1)$$

$$u_2 = 2,76 \text{ km} / \text{h} = 2,76 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times 10^5 \frac{\text{cm}}{\text{km}} \times \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} = 76,67 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Η μέγιστη τάση υδρατμών e_s είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και βρίσκεται από πίνακες. $T = 23,9^\circ\text{C} \longrightarrow e_s = 29,36 \text{ mb}$

Εξάτμιση

Παράδειγμα 1

Λύση

$$h_r = 100 \frac{e_2}{e_s} \Rightarrow e_2 = \frac{h_r \cdot e_s}{100} \Rightarrow e_2 = \frac{68,8 \cdot 29,36}{100} \Rightarrow e_2 = 20,2 \text{ mb}$$

Άρα η εξίσωση (1) γίνεται :

$$E = 1,46 \times 10^{-4} A^{-0,05} u_2 (e_s - e_2) = 1,46 \times 10^{-4} \cdot 5^{-0,05} \cdot 76,67 (29,36 - 20,2) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{E = 0,095 \text{ cm/day}}$$

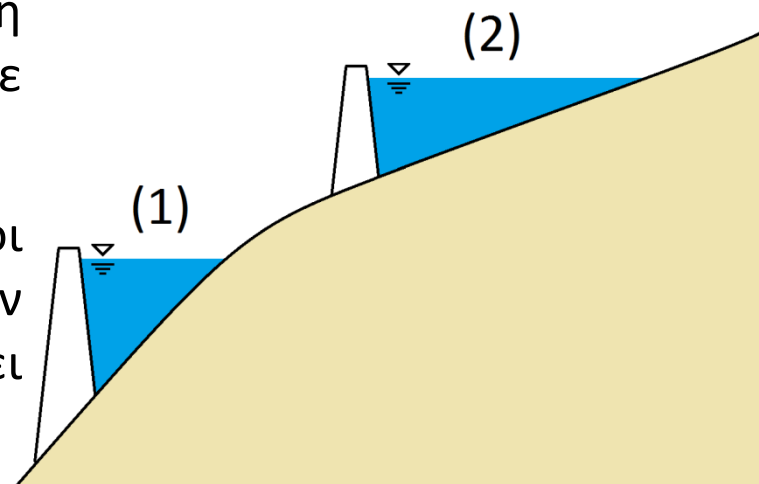
Από εκεί και πέρα θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε και άλλα μεγέθη όπως π.χ.

Όγκος νερού που αντιστοιχεί σε αυτή την τιμή εξάτμισης:

$$V = A \times E \times 30d = 5 \times 10^6 \text{ m}^2 \times 0,095 \times 10^{-2} \text{ m/d} \times 30 \text{ d} \Rightarrow \boxed{V = 142500 \text{ m}^3/\text{month}}$$

Περιορισμός απωλειών λόγω εξάτμισης

1. Επιλογή σωστής θέσης για την κατασκευή του ταμιευτήρα. Η θέση (1) είναι πιο κατάλληλη από τη θέση (2) διότι στη θέση (1) έχουμε μεγαλύτερο βάθος και μικρότερη επιφάνεια.
2. Χρήση χημικών ουσιών (π.χ. δεκαεξανόλη) οι οποίες σχηματίζουν λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του ταμιευτήρα το οποίο εμποδίζει την εξάτμιση.



Μειονεκτήματα της μεθόδου:

- Ευαισθησία του στρώματος σε κυματισμούς
 - Μείωση της ανταλλαγής οξυγόνου με την ατμόσφαιρα.
3. Υπόγεια αποθήκευση νερού, η οποία όμως έχει τα εξής μειονεκτήματα:
 - Δαπάνη ενέργειας για την άντληση του νερού
 - Το νερό χρειάζεται προεπεξεργασία για να διοχετευτεί.
 - Το νερό που θα αποθηκευτεί μπορεί να διαφύγει.

Εξατμισοδιαπνοή (ΕΤ)

Παράγοντες που επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή:

1. Μετεωρολογικοί
 - Ηλιακή ακτινοβολία, Υγρασία, Θερμοκρασία, Ταχύτητα ανέμου
2. Φυτά
 - Φυτικοί συντελεστές, Είδος βλάστησης
3. Έδαφος
 - Υδατοϊκανότητα, Σημείο μόνιμης μάρανσης

Υδατοϊκανότητα είναι η ποσότητα νερού την οποία μπορεί να κρατήσει το έδαφος ενάντια στην επίδραση της βαρύτητας. Καθορίζει τη μέγιστη ποσότητα νερού που είναι διαθέσιμη για εξάτμιση.

Σημείο μόνιμης μάρανσης είναι η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό όταν τα φυτά μαραίνονται οριστικά. Είναι το νερό που δεν μπορούν να απορροφήσουν τα φυτά για να εξισορροπήσουν την διαπνοή.

Εξατμισοδιαπνοή (ET)

➤ Κατηγορίες εξατμισοδιαπνοής

- ✓ **Δυνητική, ET_p** : είναι η ποσότητα νερού που εξατμίζεται από έδαφος και φυτά, όταν υπάρχει απεριόριστα διαθέσιμο νερό
- ✓ **Πραγματική, ET_a** : είναι η ποσότητα νερού που εξατμίζεται από έδαφος και φυτά, όταν δεν υπάρχει απεριόριστα διαθέσιμο νερό.
- ✓ Ισχύει $ET_p > ET_a$,
- ✓ Πότε έχουμε δυνητική και πότε πραγματική εξαρτάται από το έδαφος που εξετάζουμε

Εξατμισοδιαπνοή (ET)

- ✓ **Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς, ET_0 :** ρυθμός ET από μια εκτεταμένη επιφάνεια χλόης, ύψους 8-15 cm, με ομοιόμορφη κάλυψη και ύψος, ζωηρής ανάπτυξης και με επάρκεια νερού
- ✓ **Εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας, ET_c :** ρυθμός ET μιας καλλιέργειας απαλλαγμένης από ασθένειες, αναπτυσσόμενης σε μεγάλη έκταση, με σωστή λίπανση, βέλτιστες συνθήκες υγρασίας & αερισμού, βέλτιστης απόδοσης
- ✓ **Φυτικοί συντελεστές, k_c :** $k_c = ET_c / ET_0$

Η μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής γίνεται με τα **λυσίμετρα**, τα οποία είναι δοχεία με επιφάνεια μεγαλύτερη του 1m^2 τα οποία θάβουμε και στην επιφάνειά τους επαναφέρουμε τις ίδιες συνθήκες βλάστησης που επικρατούν στην περιοχή.

Τρόποι Υπολογισμού Δυνητικής Εξατμισοδιαπνοής

- ✓ Θεωρητικές και ημιθεωρητικές μέθοδοι
 - Ισοζύγιο ενέργειας μιας ιδεατής επιφάνειας
 - Αεροδυναμική μεθοδολογία
 - Εξίσωση συνδυασμού κατά Penman & παραλλαγές αυτής
 - Ισοζύγιο νερού αρδευόμενης έκτασης
- ✓ **Εμπειρικές μέθοδοι**
 - **Thornthwaite**
 - **Blaney – Criddle**
 - Hangreaves
 - Jure
 - FAO-24

Εμπειρικές Μέθοδοι Υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής

Μέθοδος Thornthwaite

- Το δεδομένο που απαιτείται είναι μόνο η θερμοκρασία.
- Η μέθοδος δίνει σαν αποτέλεσμα τη μέση μηνιαία τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (mm/mo)
- Ισχύει για επιφάνειες με απεριόριστη διαθεσιμότητα νερού και επάρκεια σε φυτοκάλυψη.

$\frac{mm}{month}$

$$ET_p' = 16 \left(\frac{10T}{T_E} \right)^a$$

- T είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα ($^{\circ}C$)
- T_E είναι ο ετήσιος θερμικός δείκτης του Thornthwaite ο οποίος είναι το άθροισμα των 12 μηνιαίων θερμικών δεικτών
- a είναι συντελεστής που εξαρτάται από το θερμικό δείκτη T_E

$$T_E = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} T_E^3 - 7,71 \times 10^{-5} T_E^2 + 1,972 \times 10^{-2} T_E + 0,49239$$

Εμπειρικές Μέθοδοι Υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής

Μέθοδος Thornthwaite

- Η μέθοδος παρέχει τιμές δυνητικής ET οι οποίες αναφέρονται σε διάρκεια ημέρας ίση με 12 ώρες και διάρκεια μήνα ίση με 30 ημέρες.
- Για να βρούμε την πραγματική τιμή αντιστοιχεί σε μία περιοχή πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την τιμή που βρήκαμε με ένα συντελεστή c (Πίνακας 1).

$$ET = c \cdot ET_p$$

Πίνακας 1. Τιμές συντελεστή c .

Γεωγραφικό πλάτος	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.13	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Εμπειρικές Μέθοδοι Υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής

Μέθοδος Blaney-Criddle

- Λαμβάνει υπόψη την επίδραση του φυτού με μεγαλύτερη ακρίβεια.
- Χρησιμοποιείται πάρα πολύ στον Ελληνικό χώρο.
- Δίνει την **αναγκαία κατανάλωση** u = εξατμισοδιαπνοή + ποσότητα νερού που παρακρατεί το φυτό για την ανάπτυξη του φυτικού του ιστού (mm/mo).
- Λαμβάνει υπόψη το είδος της καλλιέργειας (φυτικοί συντελεστές).

$$u = k_c \cdot f$$

- k_c είναι ο μηνιαίος φυτικός συντελεστής (βρίσκεται από δεδομένο πίνακα)
- f είναι κλιματικός παράγοντας

$$f = (0,457 \cdot T + 8,128) p$$

- p είναι το μηνιαίο ποσοστό των ωρών ημέρας (%) προς το συνολικό αριθμό ωρών ημέρας του έτους (βρίσκεται από δεδομένο πίνακα)
- Σε ασκήσεις όπου δίνεται το είδος της καλλιέργειας χρησιμοποιούμε τη μέθοδο **Blaney-Criddle**

Μέθοδος Blaney - Criddle

Πίνακας 2. Τιμές παραμέτρου p

Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος	ΙΑΝ.	ΦΕΒ.	ΜΑΡ	ΑΠΡ.	ΜΑΙ.	ΙΟΥΝ.	ΙΟΥΛ.	ΑΥΓ.	ΣΕΠ.	ΟΚΤ.	ΝΟΕ.	ΔΕΚ.
24	7,58	7,17	8,4	8,6	9,3	9,2	9,41	9,05	8,31	8,09	7,43	7,46
26	7,49	7,12	8,4	8,64	9,38	9,3	9,49	9,1	8,31	8,06	7,36	7,35
28	7,4	7,07	8,39	8,68	9,46	9,38	9,58	9,16	8,32	8,02	7,27	7,27
30	7,3	7,03	8,38	8,72	9,53	9,49	9,67	9,22	8,34	7,99	7,19	7,14
32	7,2	6,97	8,37	8,75	9,63	9,6	9,77	9,28	8,34	7,93	7,11	7,05
34	7,1	6,91	8,36	8,8	9,72	9,7	9,88	9,33	8,36	7,9	7,02	6,92
36	6,99	6,86	8,35	8,85	9,81	9,83	9,99	9,4	8,36	7,85	6,92	6,79
38	6,87	6,79	8,34	8,9	9,92	9,95	10,1	9,47	8,38	7,8	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	10,14	10,21	10,35	9,62	8,4	7,7	6,62	6,38
44	6,49	6,58	8,3	9,05	10,26	10,38	10,49	9,7	8,41	7,63	6,49	6,22
46	6,33	6,5	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	10,8	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	8,44	7,43	6,07	5,65

Εκτίμηση Πραγματικής Τιμής της Εξατμισοδιαπνοής

Μέθοδος Coutagne

$$ET = P \left(1 - \frac{P}{l} \right) \quad (\text{mm/έτος})$$

όπου P : ετήσιο ύψος βροχής (mm)

$$l = 800 + 140 \cdot T \quad (\text{mm})$$

T = η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα

- Η μέθοδος υπολογίζει μέσο ετήσιο έλλειμμα ροής (πραγματική εξατμισοδιαπνοή) σε mm.
- Για να ισχύει ο παραπάνω τύπος πρέπει να ισχύει ότι : $l/8 \leq P \leq l/2$
- Αν $P < l/8$ τότε το T είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με το P , δηλαδή εξατμίζεται όσο νερό πέφτει. \longrightarrow $ET = P$
- Αν $P > l/2$ τότε το P είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με το T , δηλαδή εξατμίζεται όσο νερό μπορεί με τη διαθέσιμη ενέργεια. \longrightarrow $ET = \frac{l}{4} = 200 + 35 \cdot T$

Εκτίμηση Πραγματικής Τιμής της Εξατμισοδιαπνοής

Μέθοδος Turc

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0,90 + (P/L)^2}} \quad (\text{mm/έτος})$$

όπου P : ετήσιο ύψος βροχής (mm)

$L = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3$ (mm)

T = η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα

- Η μέθοδος Turc είναι εμπειρική μέθοδος και παραπάνω σχέση έχει προκύψει μέσω στατιστικής ανάλυσης 254 λεκανών παγκοσμίως.
- Η μέθοδος υπολογίζει μέσο ετήσιο έλλειμμα ροής (πραγματική εξατμισοδιαπνοή) σε mm.

Τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω μεθόδων (Coutagne και Turc) δεν διαφέρουν σημαντικά. Δεν υπάρχει κριτήριο για το ποια από τις δύο θα χρησιμοποιήσουμε.

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή συχνά αναφέρεται και ως **έλλειμμα ροής**, δηλαδή είναι η διαφορά του μέσου ύψους βροχόπτωσης με το μέσο ύψος της απορροής.

Παράδειγμα 2

Για μια πεδιάδα που βρίσκεται σε Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος 40° να υπολογιστεί η τιμή της μέσης ετήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες που χαρακτηρίζουν την εν λόγω πεδιάδα δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

ΜΗΝΑΣ	T (°C)	$(T/5)^{1,514}$	ETp' (mm)	C	ET _p (mm)
ΙΑΝ.	3,5	0,58	5,13	0,84	4,31
ΦΕΒ.	5,9	1,28	11,92	0,83	9,90
ΜΑΡ	8,6	2,27	21,90	1,03	22,56
ΑΠΡ.	14,3	4,91	49,77	1,11	55,24
ΜΑΙ.	17,8	6,84	70,87	1,24	87,87
ΙΟΥΝ.	23,9	10,68	114,03	1,25	142,54
ΙΟΥΛ.	25,9	12,06	129,82	1,27	164,87
ΑΥΓ.	26,5	12,49	134,71	1,18	158,96
ΣΕΠ.	23,1	10,15	107,93	1,04	112,25
ΟΚΤ.	15,1	5,33	54,34	0,96	52,17
ΝΟΕ.	11,1	3,34	33,07	0,83	27,45
ΔΕΚ.	4,5	0,85	7,70	0,81	6,24
		T_E = 70,80			ET_p = 844,35

Λύση:

$$ET_p' = 16 \left(\frac{10T}{T_E} \right)^a$$

$$T_E = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514}$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} T_E^3 - 7,71 \times 10^{-5} T_E^2 + 1,972 \times 10^{-2} T_E + 0,49239$$

Παράδειγμα 3

Να υπολογιστεί ο απαιτούμενος όγκος σε αρδευτικό νερό για μια καλλιέργεια βαμβακιού έκτασης 500 στρεμμάτων, η οποία βρίσκεται σε Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος 40°. Δίνονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες και οι μέσες μηνιαίες κατακρημνίσεις της περιοχής και ο μηνιαίος φυτικός συντελεστής για το βαμβάκι.

Λύση:

$$u = k_c \cdot f$$

$$f = (0,457 \cdot T + 8,128) p$$

ΜΗΝΑΣ	T (°C)	P (mm)	k_c	p	f (mm)	u (mm)	A(m ²)	d_n (mm)	V (m ³)
ΜΑΙ.	18,7	45	0,30	10,02	167,07	50,12	500000,00	5,12	2.560,87
ΙΟΥΝ.	23,3	43	0,45	10,08	189,26	85,17	500000,00	42,17	21.084,19
ΙΟΥΛ.	26,4	22,5	0,90	10,22	206,37	185,73	500000,00	163,23	81.616,69
ΑΥΓ.	25,7	20,1	1,00	9,54	189,59	189,59	500000,00	169,49	84.743,73
ΣΕΠ.	22,4	29,8	1,00	8,38	153,90	153,90	500000,00	124,10	62.048,51
									252.054,00

Βιβλιογραφία

- Τεχνική Υδρολογία, Λευθεριώτης Γεώργιος, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2021.
- Τεχνική Υδρολογία, Σακκάς Ι.Γ., Τόμος 1, Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων, Εκδόσεις Αϊβάζης, 2007.
- Τεχνική Υδρολογία, Μιμίκου Μ.Α., Μπαλτάς Ε.Α. 6^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2018.
- Υδατικοί Πόροι II: Εφαρμογές Τεχνικής Υδρολογίας, Τσακίρης Γ., Βαγγέλης Χ. Εκδόσεις Συμμετρία, 2009.