



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΡΑΚΗΣ

Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Υδρολογίας και Υδραυλικών Έργων

Μάθημα: ΥΔΡΟΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

6^η Διάλεξη : Μοντελοποίηση της Εξατμισοδιαπνοής

Φώτιος Π. Μάρης, Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Πηγή:

Τίτλος Συγγράμματος: ΥΔΡΟΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ
Φ.Μάρης, Σπ.Παπαρρίζος, Γ.Καράτζιος
Εκδόσεις: ΔΙΣΙΓΜΑ

➤ Εισαγωγή

- Η **εξάτμιση** (Evaporation) είναι το φαινόμενο μέσω του οποίου τα μόρια ενός σώματος μεταπίπτουν από την υγρή ή τη στερεά φάση, στην αέρια.
- Η εξάτμιση του νερού στην ατμόσφαιρα γίνεται από τις υδάτινες μάζες, όπως είναι οι ωκεανοί, οι λίμνες και τα ποτάμια και επίσης από τα έλη, το έδαφος και τις υγρές καλλιέργειες.
- Η εξάτμιση είναι ένα σημαντικό συστατικό του υδρολογικού κύκλου και η εκτίμησή της χρησιμοποιείται ευρέως σε υδρολογικές μελέτες ή μελέτες άρδευσης καθώς και μηχανολογικές εφαρμογές.
- Ειδικότερα, η ακριβής εκτίμηση της εξάτμισης είναι απαραίτητη για πολλές μελέτες, όπως σε μελέτες υδατικού ισοζυγίου, στο σχεδιασμό και τη διαχείριση των υδατικών πόρων καθώς και στον προγραμματισμό των αρδεύσεων.
- Οι τεχνικές άμεσης μέτρησης της εξάτμισης δεν συνιστώνται για τη συνήθεις υδρολογικές ή μηχανολογικές εφαρμογές, επειδή αυτό είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί ακριβό εξοπλισμό προκειμένου να γίνουν ακριβή και προσεκτικά σχεδιασμένα πειράματα.

➤ Εισαγωγή

- Η **διαπνοή** (Transpiration) είναι η διαδικασία με την οποία τα φυτά χρησιμοποιούν το νερό για το μεταβολισμό και την ανάπτυξη τους.
- Τα φυτά απορροφούν το εδαφικό νερό με το ριζικό τους σύστημα και το μεταβιβάζουν στην ατμόσφαιρα υπό μορφή υδρατμών, δια των πόρων που υπάρχουν στο φύλλωμα τους, που είναι γνωστοί ως στόματα
- Η **επιφανειακή εξατμισοδιαπνοή** (Evapotranspiration - ET) μεταφέρει μεγάλες ποσότητες νερού από το έδαφος (**εξάτμιση**) και τη βλάστηση (**διαπνοή**) στην ατμόσφαιρα.
- Η ποσοτικοποίηση της κατανάλωσης του νερού σε μεγάλες περιοχές σε μελέτες άρδευσης είναι σημαντική για τη διαχείριση των δικαιωμάτων του νερού, το σχεδιασμό των υδάτινων πόρων, τα υδατικά ισοζύγια και τη ρύθμιση του υδρολογικού κύκλου.

➤ Εισαγωγή

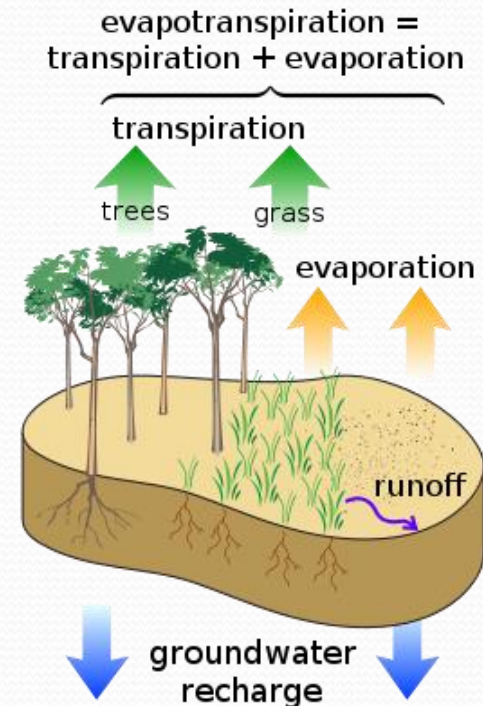
- Η **δυναμική εξατμισοδιαπνοή** (Potential Evapotranspiration - PET) ορίζεται ως η ποσότητα του νερού που μπορεί δυναμικά να εξατμιστεί και να διαπνεύσει από την επιφανειακή βλάστηση χωρίς άλλους περιορισμούς εκτός από την ατμοσφαιρική ζήτηση.
- Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή (PET) παρέχει μια καλή αναπαράσταση της μέγιστης δυνατής απώλειας νερού προς την ατμόσφαιρα.
- Η γνώση των ποσοστών της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής είναι απαραίτητη για μια ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των υδρολογικών μοντέλων, το σχεδιασμό των αρδεύσεων, για διάφορες γεω-βοτανικές μελέτες, καθώς και για την εκτίμηση των ευαίσθητων σε κλιματικές αλλαγές- δεικτών ξηρασίας.
- Παρά το γεγονός ότι η έννοια της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, ο όρος θεωρείται μια πηγή σύγχυσης λόγω του ασαφούς ορισμού του «επιφανειακή βλάστηση» (vegetated surface).
- Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, ο όρος PET έχει σταδιακά αντικατασταθεί από αυτόν της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (PET_{ref}), για τον οποίο έχουν τυποποιηθεί τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής βλάστησης.

➤ Εισαγωγή

- Η **δυναμική εξατμισοδιαπνοή αναφοράς** (PET_{ref}) ορίζεται ως η ποσότητα του νερού που μπορεί δυναμικά να εξατμιστεί και να διαπνεύσει από μια καλλιέργεια χωρίς περιορισμούς εκτός από την ατμοσφαιρική ζήτηση.
- Η τροποποιημένη μέθοδος FAO των Penman-Monteith μπορεί να εκτιμήσει ικανοποιητικά την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς στον Ελλαδικό χώρο.
- Ωστόσο, ακόμη και αυτή η μέθοδος τείνει να δημιουργήσει υπερεκτιμήσεις της PET_{ref} κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, και υποεκτιμήσεις κατά τους χειμερινούς.
- Στον Ελλαδικό χώρο έχουν γίνει εκτεταμένες έρευνες ενώ διάφορες μελέτες έχουν καταφέρει να απλοποιήσουν κατά μεγάλο ποσοστό τον υπολογισμό.
- Ο υπολογισμός της δυναμικής εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (PET_{ref}) είναι σημαντικός γιατί τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου για διάφορες υδρολογικές, γεωργικές και άλλες εφαρμογές.
- Η πραγματική μέτρηση της PET_{ref} είναι μια επίσης μια δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία και απαιτεί άρτια εκπαιδευμένο ερευνητικό προσωπικό.

➤ Εισαγωγή

- Σχετικά με την μοντελοποίηση των επιπτώσεων της αλλαγής του κλίματος, η επίτευξη του υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής παρουσιάζει σημαντικό ενδιαφέρον για την επαρκή εκτίμηση των αλλαγών στα οικοσυστήματα με πάροδο του χρόνου.
- Σε περιοχές όπου η άρδευση είναι ένα σημαντικό συστατικό του γεωργικού τομέα λόγω της χαμηλής βροχόπτωσης, είναι επίσης οικονομικής σημασίας ο όσο το δυνατόν ακριβέστερος υπολογισμός της PET_{ref} .
- Συγκεκριμένα, η PET_{ref} είναι σε αυτές τις περιοχές το πιο σημαντικό στοιχείο του υδρολογικού κύκλου μαζί με τις κατακρημνίσεις.



➤ Εισαγωγή

- Όσον αφορά τη γεωργική παραγωγή, η δυνητική εξατμισοδιαπνοή διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες και τις δραστηριότητές της.
- Το είδος της καλλιέργειας, η ποικιλία και η ανάπτυξη θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής σε καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε μεγάλες εκτάσεις.
- Οι διαφορές στην αντίσταση της διαπνοής, το ύψος των καλλιεργειών, η τραχύτητα των καλλιεργειών, η εδαφοκάλυψη και τα χαρακτηριστικά της ριζοβολίας των καλλιεργειών μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά επίπεδα της εξατμισοδιαπνοής, σε διαφορετικούς τύπους καλλιεργειών υπό τις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Η εξατμισοδιαπνοή στις καλλιέργειες υπό κανονικές συνθήκες, αναφέρεται στην εξάτμιση της ζήτησης από τις καλλιέργειες που αναπτύσσονται σε μεγάλες εκτάσεις υπό τις καλύτερες δυνατές νερού στο έδαφος, με άριστη διαχείριση και περιβαλλοντικές συνθήκες, ούτως ώστε να επιτευχθεί η πλήρης παραγωγή υπό τις δεδομένες κλιματολογικές συνθήκες.

➤ Εισαγωγή

- Λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας η οποία είναι απαραίτητη για τη μέτρηση της ύγρανσης, έχουμε να καταφύγει σε μαθηματικές συναρτήσεις για τον προσδιορισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.
- Οι λειτουργίες αυτές είναι συχνά η μόνη δυνατότητα για να ολοκληρωθεί μια λεπτομερή ανάλυση και μοντελοποίηση της εξατμισοδιαπνοής.
- Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται εκτίμηση και μοντελοποίηση της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιώντας το λογισμικό EmPEst το οποίο αναλύεται στη συνέχεια.
- Η περιοχή μελέτης που γίνεται η εφαρμογή είναι η λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού.

➤ EmPEst – Μοντελοποίηση Εξατμισοδιαπνοής

- Το **EmPEst (Empirical Potential Evapotranspiration estimation)** είναι ένα απλό λογισμικό που μπορεί να υπολογίσει τις ημερήσιες τιμές της PET_{ref} μέσω **13** διαφορετικών **εμπειρικών εξισώσεων**.
- Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το είδος της καλλιέργειας (χαμηλή ή υψηλή), έτσι ώστε το λογισμικό να χρησιμοποιήσει τις κατάλληλες παραμέτρους στην εξίσωση της εξατμισοδιαπνοής.
- Οι εμπειρικές εξισώσεις της PET_{ref} που συμπεριλαμβάνονται στο λογισμικό, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα απαιτήσεων για τα δεδομένα εισόδου.
- Το λογισμικό περιλαμβάνει εξισώσεις που απαιτούν μόνο την ημερήσια θερμοκρασία του αέρα και εξισώσεις που απαιτούν την ημερήσια θερμοκρασία του αέρα, την ακτινοβολία και τη σχετική υγρασία ως δεδομένα εισόδου.
- Ο αριθμός των εξισώσεων που θα παράγει τις τελικές εκτιμήσεις της PET_{ref} εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων.

➤ EmPEst – Μοντελοποίηση Εξατισοδιαπνοής

- Εάν ο χρήστης το επιθυμήσει και ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, μπορεί να υπολογίσει ημερήσιες τιμές πέντε διαφορετικών στατιστικών δεικτών για την αξιολόγηση αυτών των εμπειρικών εξισώσεων σε σχέση με την εξίσωση υπολογισμού της εξατισοδιαπνοής PET_{ASCE} .
- Οι δείκτες που εφαρμόζονται για την αξιολόγηση της απόδοσης των εμπειρικών εξισώσεων είναι:

➤ **Mean Square Error (MSE)**

$$\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{N - 1}$$

➤ **Mean Absolute Error (MAE)**

$$\frac{\sum_{i=1}^N |E_i - O_i|}{N - 1}$$

➤ **Relative Mean Square Error (RMSE)**

$$\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{E_i - O_i}{E_i}\right)^2}{N - 1}$$

➤ **Relative Mean Absolute Error (RMAE)**

$$\frac{\sum_{i=1}^N \frac{|E_i - O_i|}{E_i}}{N - 1}$$

➤ **Mean Bias Error (MBE)**

$$\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)}{N - 1}$$

Όπου:

N ο αριθμός των παρατηρήσεων

E_i οι τιμές από τις εμπειρικές εξισώσεις

O_i οι αντίστοιχες τιμές από την εξίσωση PET_{FAO}

➤ EmPEst – Μεθοδολογία

- Δεκατρία μοντέλα υπολογισμού της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής αναφοράς χρησιμοποιούνται στο λογισμικό που συμπεριλαμβάνουν τις προσεγγίσεις:
 - **Hargreaves**
 - **McGuinness**
 - **Jensen**
 - **Hansen**
 - **Caprio**
 - **Romanenko**
 - **Turc**
 - **Makkink**
 - **de Bruin**
 - **McCloud**
 - 3 versions του **Hamons** (**Hamon1**, **Hamon2**, **Hamon3**)

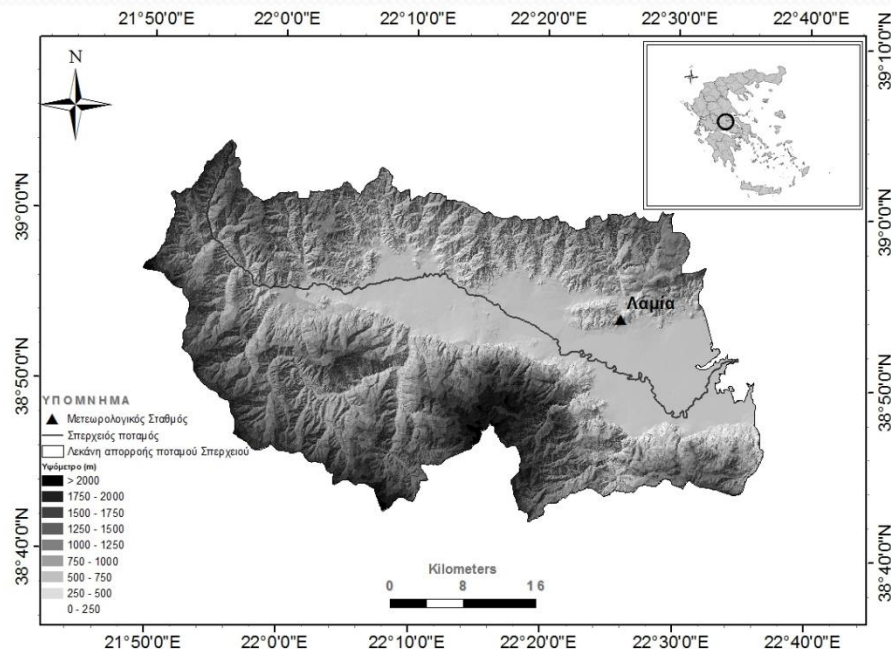
➤ EmPEst – Μεθοδολογία

- Για τη στατιστική αξιολόγηση της επίδοσης του μοντέλου χρησιμοποιείται όπως προαναφέρθηκε:
- μέσο απόλυτο σφάλμα (**MAE**)
- μέσο σχετικό τετραγωνικό σφάλμα (**MRSE**)
- μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα (**MRAE**)
- μέσο σφάλμα πόλωσης (**MBE**)
- μέσο σχετικό τετραγωνικό σφάλμα (**RMSE**).
- Είναι προφανές ότι όλες οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ανάλυσης αβεβαιότητας δεν μπορούν να κάνουν κάποια δήλωση σχετικά με τη σημασία της επίδοσης του μοντέλου.
- Με άλλα λόγια, οι μέθοδοι που αναφέρονται παραπάνω υπάρχουν προκειμένου να ελεγχθεί η συσχέτιση μεταξύ μιας σειράς από αριθμούς από ένα συγκεκριμένο δείγμα και να βρεθούν οι πιθανές ασάφειες, όχι να εξεταστεί η αξιοπιστία της επίδοσης του μοντέλου.

➤ EmPEst – Παράδειγμα εφαρμογής

- Προκειμένου να γίνει η εφαρμογή του μοντέλου EmPEst για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού συλλέχθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της «Λαμίας» που βρίσκεται στη λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού τα στοιχεία του πίνακα 1.
- Το σχήμα παρουσιάζει τη λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης με την τοποθεσία του μετεωρολογικού σταθμού, ο πίνακας 2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά του μετεωρολογικού σταθμού που χρησιμοποιήθηκε.

Σχήμα: Λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού με την τοποθεσία του Μ.Σ. της «Λαμίας»



➤ EmPEst – Παράδειγμα εφαρμογής

- **Πίνακας 1:** Μετεωρολογικά δεδομένα (ημερήσιο βήμα) που συλλέχθηκαν από το Μ.Σ. της «Λαμίας»

Μεταβλητή	Περιγραφή
T_{mean}	Μέση ημερήσια θερμοκρασία 2 m από το έδαφος (°C)
T_{min}	Ελάχιστη θερμοκρασία αέρα (°C)
T_{max}	Μέγιστη θερμοκρασία αέρα (°C)
T_d	Σημείο δρόσου (°C)
RH	Σχετική υγρασία (%)
U_2	Ταχύτητα ανέμου 2 m από το έδαφος (m · s ⁻¹)

- **Πίνακας 2:** Χαρακτηριστικά Μ.Σ. της «Λαμίας»

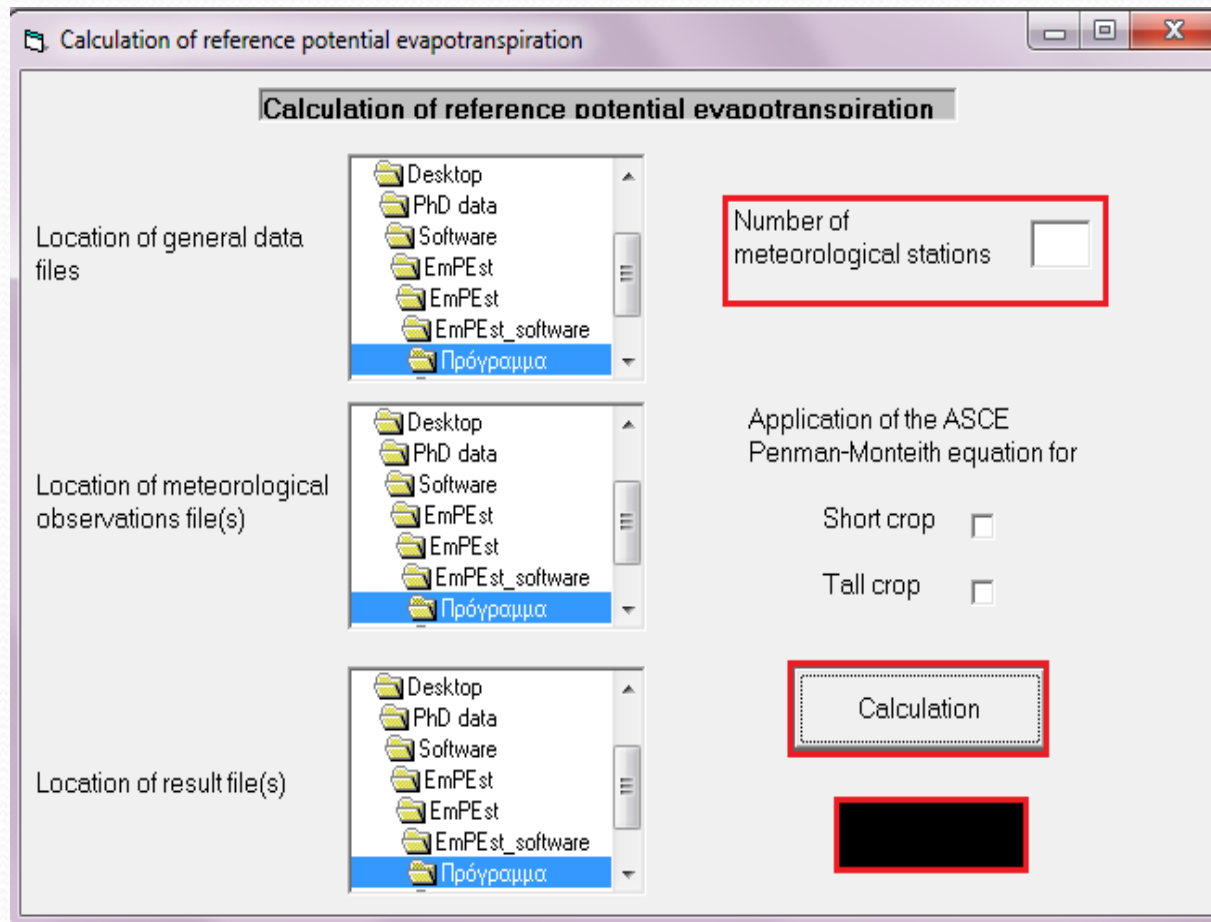
Μετεωρολογικός Σταθμός	Λαμία
Υψόμετρο	144 m
Γεωγραφικό πλάτος	38° 51'
Γεωγραφικό μήκος	22° 24'
Περίοδος παρατηρήσεων	1981 - 2000

➤ EmPEst – Παράδειγμα εφαρμογής

- Αφού συγκεντρώσουμε όλα τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου και τα περάσουμε σε ένα φύλλο Excel ανοίγουμε το λογισμικό, επιλέγουμε το αρχείο Excel που μόλις δημιουργήσαμε, τον αριθμό των μετεωρολογικών σταθμών (στην περίπτωσή μας θα βάλουμε 1 γιατί έχουμε μόνο ένα Μ.Σ.), το είδος της καλλιέργειας που υπάρχει και θα πατήσουμε Calculation προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός της PET_{ref} .
- Το μαύρο πλαίσιο που υπάρχει στο Interface του λογισμικού μας ενημερώνει εάν έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία, ή εάν υπάρχει κάποιο σφάλμα με τα δεδομένα και πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες τροποποιήσεις και να το «τρέξουμε» ξανά.
- Τα αποτελέσματα του μοντέλου δίνονται σε μορφή .txt

➤ EmPEst – Παράδειγμα εφαρμογής

- Σχήμα 2: Λογισμικό EmPEst



➤ EmPEst – Παράδειγμα εφαρμογής

- Μετά το πέρας της διαδικασίας και αφού κάνουμε τις απαραίτητες μετατροπές των ημερήσιων δεδομένων σε μηνιαία ή ετήσια (προκειμένου να είναι ευπαρουσίαστα τα αποτελέσματα και ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε μελέτης) μπορούμε να δούμε στον πίνακα 3 τις υπολογισμένες τιμές της PET_{ref} για το Μ.Σ. της «Λαμίας».
- Πίνακας 3:** Υπολογισμένες τιμές PET_{ref} (mm) με το λογισμικό EmPEst

PET/Μήνας	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μια	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
PET_{Har}	1	1.4	2.1	3.3	4.3	5.4	5.3	4.8	3.6	2.3	1.4	0.9
PET_{McG}	1.2	1.6	2.5	4.1	5.7	7.1	7.3	6.5	4.8	3	1.7	1.1
PET_{Rom}	2.5	2.4	3.2	4.5	6	8.6	8.5	8	6.5	4.8	3.6	2.6
PET_{Han}	1	1.3	2	3	3.8	4.5	4.3	4	3.1	2.1	1.3	0.9
PET_{Ham1}	1.5	1.6	2.2	3.1	4.3	5.5	5.8	5.5	4.3	3.2	2.2	1.6
PET_{Ham2}	1.1	1.3	2	3.3	5.1	7.6	8.2	6.8	4.5	2.6	1.5	1.1
PET_{Ham3}	0.9	1	1.5	2.4	3.6	4.8	4.9	4.4	3.1	2.1	1.3	0.9
PET_{Cap}	0.6	0.9	1.6	3	4.4	6.1	6	5.4	3.8	2.2	1.1	0.6
PET_{Jen}	0.8	1	1.8	3.2	4.7	6.3	6.2	5.6	4	2.3	1.3	0.7
PET_{McC}	0.7	0.7	1	1.8	3.3	6.1	7.4	6.6	4.3	2.3	1.2	0.8
PET_{Mak}	0.8	1	1.7	2.5	3.2	3.8	3.6	3.3	2.5	1.7	1	0.7
PET_{Tur}	0.9	1.1	1.8	2.9	3.8	4.6	4.5	4	3.2	2.2	1.4	0.9
PET_{deB}	0.7	1.2	2.1	3.2	4.1	4.8	4.6	4.1	3	1.9	1	0.6
PET_{ASCEsc}	1.9	2	2.9	4.1	5.4	6.8	6.4	5.9	4.7	3.5	2.7	1.9
PET_{ASCEtc}	3	2.9	4.3	5.9	7.7	9.8	9.1	8.4	6.9	5.2	4.2	3.1
$PET_{average}$	1.2	1.4	2.2	3.4	4.6	6.1	6.1	5.6	4.1	2.7	1.8	1.2

► EmPEst – Παράδειγμα εφαρμογής

- Στον πίνακα 4 μπορούμε να δούμε τις τιμές των στατιστικών δεικτών.

Τιμές	MSE	MAE	MRSE	MRAE	MBE
PET_{Har}	1.41	1.05	0.82	0.57	-1.04
PET_{McG}	0.78	0.71	0.29	0.31	-0.15
PET_{Rom}	1.86	1.1	0.05	0.21	1.08
PET_{Han}	2.56	1.41	0.95	0.7	-1.41
PET_{Ham1}	0.85	0.72	0.09	0.24	-0.63
PET_{Ham2}	1.57	0.99	0.29	0.4	-0.26
PET_{Ham3}	2.56	1.45	0.75	0.75	-1.44
PET_{Cap}	1.5	1.09	4.82	1.05	-1.03
PET_{Jen}	1.2	0.96	2.39	0.83	-0.87
PET_{McC}	3.77	1.59	2.53	1.17	-1
PET_{Mak}	4.25	1.87	2.57	1.15	-1.87
PET_{Tur}	2.44	1.42	2.04	0.74	-1.42
PET_{deB}	2.54	1.42	1.2	0.83	-1.42

➤ EmPEst – Παράδειγμα εφαρμογής

- Ο υπολογισμός των τιμών PET_{ref} με τις 13 μεθόδους δείχνει ότι το λογισμικό ανταποκρίνεται αρκετά καλά.
- Βέβαια υπάρχουν κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των μεθόδων.
- Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε μέθοδος χρησιμοποιεί διαφορετικά δεδομένα εισόδου.
- Για παράδειγμα, στον πίνακα 3 και για το μήνα Ιούνιο, παρατηρούμε ότι υπάρχουν εμφανείς διαφορές μεταξύ των μεθόδων στην εκτίμηση της PET_{ref} .
- Οι τιμές ποικίλουν μεταξύ 3.6 mm/ημέρα and 9.1 mm/ημέρα.
- Αυτό σημαίνει ότι ένας αγρότης χρησιμοποιώντας την τελευταία τιμή θα ποτίσει περίπου 3 φορές περισσότερο από έναν που θα χρησιμοποιήσει την πρώτη τιμή.

➤ EmPEst – Παράδειγμα εφαρμογής

- Σε αυτό το σημείο, η καλύτερη τεχνική είναι είτε να λαμβάνεται ως τιμή ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων της PE_{ref} ή να επιλέγει ο μελετητής κάθε φορά την εξίσωση (ή τις εξισώσεις) που θα χρησιμοποιήσει.
- Σε κάθε περίπτωση, το λογισμικό EmPEst είναι σε θέση να φέρει πλήρως ικανοποιητικά αποτελέσματα, καθιστώντας το πιο αξιόπιστο λογισμικό για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

