ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ PENMAN ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ.

Α. Πουλοβασίλης, Π. Κερκίδης, Σ. Ρίζος, Σ. Αλεξανδρής, Χ. Γεωργούσης

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα

Περίληψη

Στο άρθρο αυτό παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς όπως αυτά προέκυψαν με τη χρήση επτά διαφορετικών παραλλαγών της μεθόδου Penman. Μετρήσεις των σχετικών μεγεθών θερμοκρασίας αέρα T_a (°C), ταχύτητας ανέμου U ($m \cdot sec^{-1}$), σχετικής υγρασίας (%), πυκνότητας ροής ηλιακής και καθαρής ακτινοβολίας R_s & R_n ($W \cdot m^{-2}$) αντίστοιχα, λήφθηκαν από το μικρομετεωρολογικό σταθμό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στην Κωπαΐδα σε ωριαία βάση. Οι επτά παραλλαγές της μεθόδου Penman ήσαν:
I. FAO-24 Corrected Penman (Οι μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων προέρχονται από ημιάθροισμα μέγιστης - ελάχιστης τιμής)
II. FAO-24 Corrected Penman (Οι μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων προέρχονται από το σύνολο των 24 ωριαίων τιμών)
III. FAO-24 Uncorrected Penman (c=1. Κατά τα λοιπά όπως και η I)
IV. FAO-24 Corrected Penman (Κάνοντας χρήση και της ροής θερμότητας στο έδαφος G)
V. Penman (1963)
VI. Penman (1963) (Ωριαίες τιμές):
VII. Penman (1963) VPD #3 (Ο υπολογισμός του ελλείμματος κορεσμού γίνεται με την 3η μέθοδο Jensen et al., 1990)
Οι συγκρίσεις έγιναν με γραμμική παλινδρόμηση των αποτελεσμάτων κάθε μιας μεθόδου χωριστά επί των αποτελεσμάτων της τελευταίας μεθόδου (Penman 1963 VPD#3) που για τα δεδομένα της Κωπαΐδας κατά τους Jensen et al., (1990) θεωρείται η πιο αξιόπιστη. Η κατάταξη απόδοσης των διαφόρων μεθόδων, όπως προκύπτει από τις τιμές του τυπικού σφάλματος εκτίμησης SEE, του κριτηρίου F, και του συντελεστή προσδιορισμού R^2 είναι η ακόλουθη: 1η →VII, 2η→V, 3η→IV, 4η→II, 5η→I, 6η→VI, 7η→III.
Εκτός των πιο πάνω, επιχειρήθηκε η διερεύνηση της επίδρασης που έχει η χρήση εμπειρικών σχέσεων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων: λ (λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού), e_s (τάση κορεσμένων υδρατμών) και Δ (κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδρατμών), στην τελική εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής. Έτσι συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα όπως αυτά εξάγονται με τη μέθοδο FAO-24 Corrected Penman (I) με τρείς διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων λ, e_s Δ, δηλαδή: α) με εμπειρικές σχέσεις όπως προτείνεται από τους M. Smith et al., (1991), β) με εμπειρικές σχέσεις που δίνουν τις χειρότερες εκτιμήσεις και γ) με εμπειρικές σχέσεις που δίνουν τις καλύτερες εκτιμήσεις. Η τελική κατάταξη των 9 (τώρα) παραλλαγών Penman είναι: 1η →VII, 2η→V, 3η→IV, 4η→II, 5η→I, 6η→Ia, 7η→Ib, 8η→VI, 9η→III (όπου Ia: η FAO-24 Corrected Penman με τις μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων να προέρχονται από ημιάθροισμα μέγιστης - ελάχιστης τιμής, ενώ γίνεται χρήση των εξισώσεων υπολογισμού λ, e_s, Δ που δίνουν τις καλύτερες εκτιμήσεις και Ib.: η FAO-24 Corrected Penman με τις μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων να προέρχονται από ημιάθροισμα μέγιστης - ελάχιστης τιμής, ενώ γίνεται χρήση των εξισώσεων υπολογισμού λ, e_s, Δ που δίνουν τις χειρότερες εκτιμήσεις).

Abstract

In this paper the results of the comparative evaluation of reference evapotranspiration estimated according to seven different versions of the Penman method are presented. Measurements of pertinent meteorological attributes such as air temperature T_a, wind speed U, relative humidity RH, flux density of net radiation and solar radiation R_n and R_s respectively were obtained hourly from the micrometeorological station of the Agricultural University of Athens in Kopais plain, Boiotia. The seven versions of the Penman method examined are:
I. FAO-24 Uncorrected Penman (The mean daily values of the parameters are the average of the minimum and maximum values)
II. FAO-24 Corrected Penman (The mean daily values are the average of the 24 hourly values)
III. FAO-24 Uncorrected Penman (c=1 . The rest as with version I)
IV. FAO-24 Corrected Penman (Taking also account of the soil heat flux G)
V. Penman 1963

VI. Penman 1963 (Using hourly values)
VII.Penman 1963 V.P.D. #3 (Saturation deficit is estimated according to the 3rd method. see Jensen et al., 1990)
Evaluation was achieved through linear regression of the results of each one version against the results of the last version (Penman 1963 V.P.D. #3). The latter, according to Jensen et al., 1990 is considered as the most reliable for the climatic conditions of Kopais. Ranking of the methods, according to the standard error of estimates S.E.E, the F-test and the coefficient of determination R^2 is as follows: 1st → VII, 2nd → V, 3rd → IV, 4th →II, 5th → I, 6th →VII, 7th → III.
Apart from the above, an attempt was made to investigate the influence of using various empirical relationship in estimating the parameters λ (latent heat of vaporization), e_s (saturated vapour pressure) and Δ (de_s/dT) on the final estimates of λE_o.
Version I was used in which λ, e_s and Δ were given three different sets of values as follows:
a) Using the empirical relationships, suggested by M. Smith et al., (1991).
b) Using the empirical relationship which give the worst possible estimates for λ, e_s and Δ.
c) Using the empirical relationships, which give the best estimates for λ, e_s and Δ.
Final ranking of the 9 (by now) versions of the Penman method is:
1st → VII, 2nd → V, 3rd → IV, 4th →II, 5th → I, 6th →Ia, 7th → Ib, 8th →VI, 9th→III.(Ia is version I with best estimates of λ, e_s and Δ and Ib is version I with the worst estimates of λ, e_s and Δ).

Εισαγωγή

Επειδή η εξίσωση Penman, περιγράφει την εξατμισοδιαπνοή με ικανοποιητική ακρίβεια χρησιμοποιώντας απλά μετεωρολογικά δεδομένα, έτυχε ευρύτατης χρήσης και συγχρόνως απετέλεσε αντικείμενο μελέτης για τη βελτίωσή της. Έτσι διάφοροι ερευνητές έχουν δημοσιεύσει πολλές παραλλαγές και τροποποιήσεις της (π.χ.: Doorenbos & Pruitt, 1977 - Frere and Popov, 1979 - Wright, 1982, Jensen et al., 1990 κ.α.), ενώ άλλοι ασχολήθηκαν με τη συστηματοποίηση της χρήσης της.
Το γεγονός ότι στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται ένα πλήθος όχι μόνο από μεθόδους υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής, αλλά και από παραλλαγές τους, προκαλεί δυσκολίες στον ερευνητή στην εκλογή της κατάλληλης εξίσωσης. Επιπροσθέτως η απόδοση των διαφόρων εξισώσεων έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες της κάθε περιοχής.
Το συμπέρασμα λοιπόν, στο οποίο καταλήγουν όλοι, ανεξάρτητα μεταξύ τους, οι ερευνητές είναι πως θεωρείται απαραίτητη η τοπική αξιολόγηση της απόδοσης των διαφόρων εξισώσεων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής. Η εργασία αυτή αποτελεί μια προσπάθεια προς την κατεύθυνση αυτή, στον Ελληνικό χώρο.

Θεωρία

Α. Οι σχετικές εξισώσεις.

Οι μέθοδοι Penman που μελετήθηκαν και οι παραλλαγές τους, ήσαν οι παρακάτω:

1.Η F.A.O. - 24 τροποποιημένη μέθοδος Penman (FAO-24 Corrected Penman) με 4 παραλλαγές:

$$\lambda E_o = c\left[\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma} W_f\, VPD\right] \qquad (1)$$

όπου: $\lambda \cdot E_o$ = εξατ/νοή αναφοράς (W/m^2).
R_n = πυκνότητα ροής καθαρής ακτινοβολίας (W/m^2).
G = πυκνότητα ροής θερμότητας στο έδαφος (W/m^2).
W_f = συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου (W/m^2 kPa)
VPD = έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας στο ύψος των μετρήσεων (kPa)

I. FAO-24 Corrected Penman (Οι μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων προέρχονται από ημιάθροισμα μέγιστης - ελάχιστης τιμής)
I a. FAO-24 Corrected Penman (Οι μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων προέρχονται από ημιάθροισμα μέγιστης - ελάχιστης τιμής, ενώ γίνεται χρήση των εξισώσεων υπολογισμού λ, e_s, Δ που δίνουν τις καλύτερες εκτιμήσεις.)
I b. FAO-24 Corrected Penman (Οι μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων προέρχονται από ημιάθροισμα μέγιστης - ελάχιστης τιμής, ενώ γίνεται χρήση των εξισώσεων υπολογισμού λ, e_s, Δ που δίνουν τις χειρότερες εκτιμήσεις.)
II. FAO-24 Corrected Penman (Οι μέσες ημερήσιες τιμές των παραμέτρων προέρχονται από το σύνολο των 24 ωριαίων τιμών)
III. FAO-24 Uncorrected Penman (c=1. Κατά τα λοιπά όπως και η I.)
IV. FAO-24 Corrected Penman (Κάνοντας χρήση και της ροής θερμότητας στο έδαφος G)

Η εξίσωση Penman (1963) είναι ίδια με την (1), μόνο που ο αεροδυναμικός όρος πολλαπλασιάζεται με τον παράγοντα 6.43 (Jensen et al., 1990). Παρουσιάζεται με 3 παραλλαγές:

V. Penman (1963)
VI. Penman (1963) (Ωριαίες τιμές). Ίδια όπως η (1), με τη διαφορά ότι ο αεροδυναμικός όρος πολλαπλασιάζεται με το κλάσμα $\frac{6.43}{24}$ (Jensen et al., 1990).:
VII. Penman (1963) VPD #3 (Ο υπολογισμός του ελλείμματος κορεσμού γίνεται με την 3η μέθοδο Jensen et al., 1990)
Οι παραλλαγές αναφέρονται στον τρόπο υπολογισμού των παραγόντων W_f, G, VPD. Οι σχετικές πληροφορίες και οι μονάδες μετρήσεων των πιο πάνω παραγόντων παρουσιάζονται στον πίνακα I:

ΠΙΝΑΚΑΣ I: Συνοπτική παρουσίαση των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού της E_o

	VPD (kPa)	W_f (W/m² kPa)	G (W/m²)	U_2	Παραλλαγή
FAO-24 Corr. Pen.	$e_s(T_{mean}) - e_d$	$0.27 \cdot (1+0.01 \cdot U_2)$	G = 0	km/day	I. & Ia & Ib
FAO-24 Corr. Pen.	$T_{mean} = \frac{\sum T_i}{24}$ $e_s(T_{mean}) - e_d$	$0.27 \cdot (1+0.01 \cdot U_2)$	G = 0	km/day	II.
FAO-24 Uncorrected Penman.	$e_s(T_{mean}) - e_d$	$0.27 \cdot (1+0.01 \cdot U_2)$	G = 0	km/day	III. με: c=1
FAO-24 Corr. Pen.	$e_s(T_{mean}) - e_d$	$0.27 \cdot (1+0.01 \cdot U_2)$	$G = 0.38 \cdot (T_{mean} - T_{pr})$	km/day	IV.
Penman (1963)	$e_s(T_{mean}) - e_d$	$1+0.0062 \cdot U_2$	$G = 0.38 \cdot (T_{mean} - T_{pr})$	km/day	V.
Penman (1963) ωριαία	$e_s(T_i) - e_{d_i}$ $1 \le i \le 24$	Για Rn>0: $0.27+0.526 \cdot U_2$ και για Rn<0 $1.14+0.401 \cdot U_2$	Για $07.00h \le t \le 18.00h$: G=0.1·Rn και για $19.00h \le t \le 06.00h$: G=0.5·Rn	km/day	VI.
Penman (1963) VPD#3	$\frac{e_{s,\max} + e_{s,\min}}{2} - e_d$	$1+0.0062 \cdot U_2$	$G = 0.38 \cdot (T - T_{pr})$	km/day	VII.

όπου: $e_d = \frac{\left[e_s(T_{\min})RH_{\max} + e_s(T_{\max})RH_{\min}\right]}{200}$; $T_{pr} = \frac{T_{\min\, p} + T_{\max\, p}}{2}$; T_{pr} = μέση θερ/σία προηγ. ημέρας ; $T_{\min\, p}$ = ελάχιστη θερ/σία προηγ. ημέρας ; $T_{\max\, p}$ = μέγιστη θερ/σία προηγ. ημέρας

Β. Αξιολόγηση εμπειρικών σχέσεων εκτίμησης των παραμέτρων λ, e_s και Δ

Όπως φαίνεται και από τη γενική εξίσωση εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής (εξ. 1) καθώς και από τα στοιχεία του πίνακα Ι, υπεισέρχονται σ' αυτήν οι παράμετροι λ (λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού), e_s (τάση κορεσμένων υδρατμών) και Δ (= $\frac{\partial e_s}{\partial T}$), όλες τους συναρτήσεις της θερμοκρασίας. Έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφορες εμπειρικές εξισώσεις που δίνουν εκτιμήσεις των παραμέτρων αυτών συναρτήσει της θερμοκρασίας. Επειδή, είναι ενδεχόμενο μια κακή εκτίμηση των παραμέτρων αυτών, να οδηγήσει σε κακή εκτίμηση της E_o, θεωρήθηκε σκόπιμη η αξιολόγηση, πρώτα των εμπειρικών αυτών σχέσεων και δεύτερον, η εκτίμηση του εύρους του σφάλματος που προκύπτει στο τελικό αποτέλεσμα E_o από τις καλύτερες και χειρότερες εκτιμήσεις των παραμέτρων αυτών.

Για τον πρώτο στόχο, βρέθηκαν από τη βιβλιογραφία 4 εμπειρικές εξισώσεις λ(Τ) (Brunt, 1952 ; Harrison, 1963 ; Mc Cumber, 1980 ; Burman et al., 1987). Θεωρώντας ως πρότυπες τιμές της λ, αυτές που παρέχονται από τον W.R. Van Wijk (1966) (πίνακας 2.4, σελ. 41) και με κριτήρια αξιολόγησης το τυπικό σφάλμα εκτίμησης SEE και το συντελεστή προσδιορισμού R^2 διαπιστώθηκαν τα εξής: Το τυπικό σφάλμα εκτίμησης κυμαίνεται από 0.061078 -Burman et al., (1987) -ως 1.766461 - Brunt, (1952) ενώ ο συντελεστής προσδιορισμού κυμαινόταν στις ίδιες εξισώσεις από 0.99997 ως 0.97549. Στην εκτίμηση της λ(Τ) προτάθηκε στην εργασία αυτή μια νέα εμπειρική εξίσωση που έδωσε: SEE = 0.055864 και R^2 = 0.99998

Για τον παράγοντα e_s(Τ) βρέθηκαν στη βιβλιογραφία 6 σχετικές εμπειρικές σχέσεις (Tetens, 1930 ; Bosen, 1960 ; Lowe, 1977, ; Wright, 1982 ; Paw U, 1988 ; Monteith and Unsworth, 1990). Πρότυπες e_s(Τ) τιμές θεωρήθηκαν οι τιμές που προέρχονται από την εξίσωση Goff-Gratch (List, 1984, p. 350 και Jensen et al., 1990. Table A3, p. 282). Όπως προέκυψε το τυπικό σφάλμα εκτίμησης κυμαίνεται από 0.153832 - Tetens, (1930) - ως 0.660391 - Monteith and Unsworth (1990). Μια νέα σχέση που προτάθηκε για τον υπολογισμό της e_s(Τ) έδωσε SEE = 0.152829.

Τέλος όσον αφορά την παράμετρο Δ κάνουμε δεκτή την προσέγγιση να υπολογίσουμε το Δ στη θερμοκρασία αέρος, για να πετύχουμε μια ικανοποιητική ακρίβεια στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής, χωρίς να γνωρίζουμε την θερμοκρασία της επιφάνειας. Εμπειρικές σχέσεις έχουν δώσει οι: Tetens (1930) ; Bosen (1960) ; Saxton (1972) ; Lowe (1977) ; Wright (1982) ; Paw U (1988) ; Monteith and Unsworth (1990). Παράλληλα αναπτύχθηκε (και συγκρίθηκε με τις υπόλοιπες σχέσεις, που αναφέρονται) πολυώνυμο 5ου βαθμού για να περιγράψει τις τιμές που παρέχει το Handbook of Chemistry and Physics (49th Edition), Από τα απότελέσματα προέκυψε ότι το τυπικό σφάλμα εκτίμησης κυμαίνεται από 0.006813 - Tetens, (1930) - ως 0.038925 - Monteith and Unsworth (1990). Η νέα σχέση έδωσε SEE = 0.005474. Ο συντελεστής προσδιορισμού κυμαινόταν στις ίδιες εξισώσεις από 0.999963 ως 0.448969, με τη νέα σχέση να εμφανίζει R^2 = 0.999976.

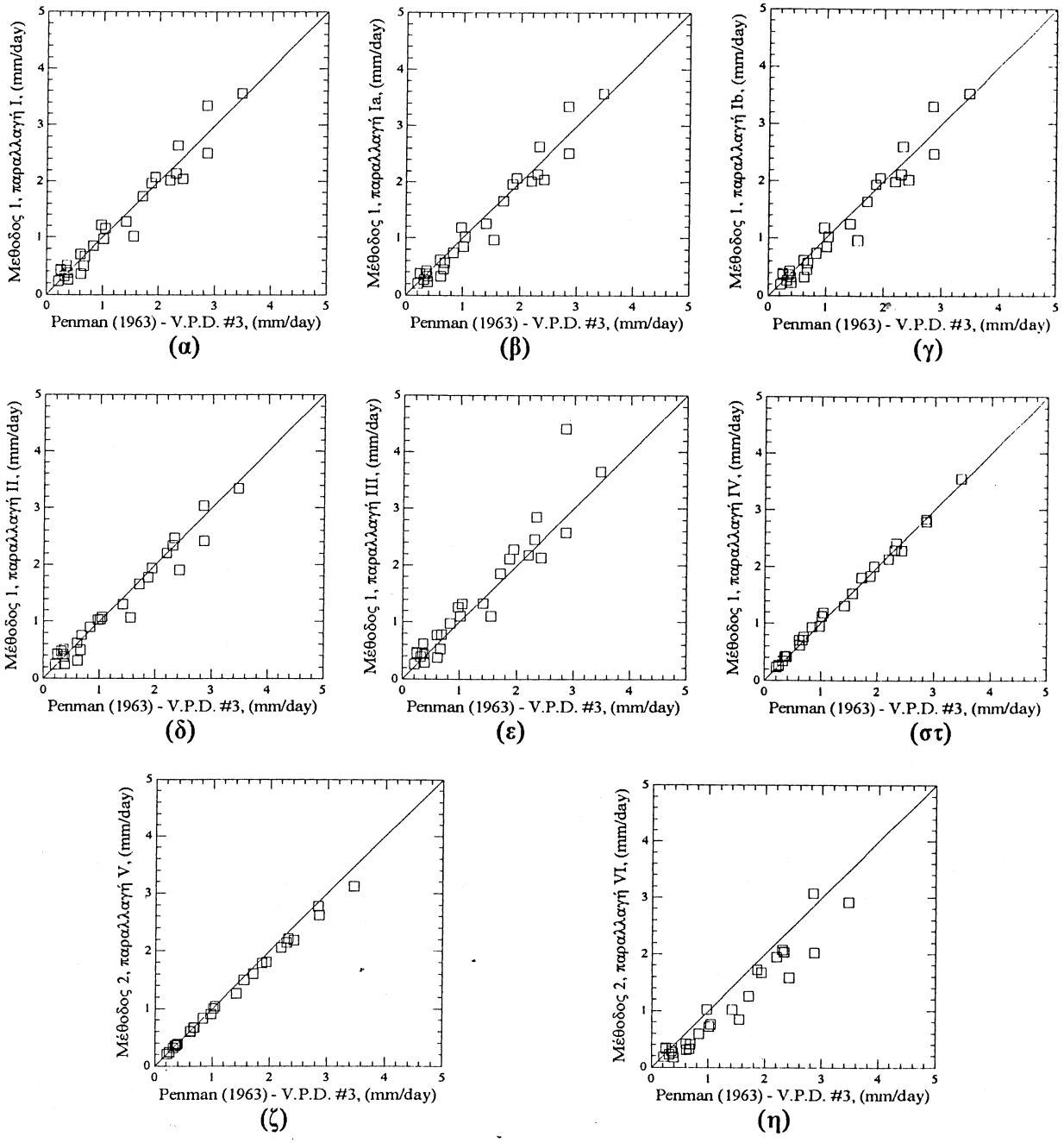
Πειραματικά στοιχεία

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της περιόδου από 1/11/1993 ως και 30/11/1993, όπως αυτά καταγράφηκαν από τα όργανα του μικρομετεωρολογικού σταθμού του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στην Κωπαΐδα (κατά τη διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος «Ορθολογική εφαρμογή της άρδευσης και αποστράγγισης κάτω από ελληνικές συνθήκες», Υπεύθυνος: Α. Πουλοβασίλης, χρηματοδότηση: Ε.Ε. και Υπουργείο Γεωργίας). Καταγράφονται μετρήσεις θερμοκρασίας αέρος (°C), ταχύτητας ανέμου ($m \cdot sec^{-1}$), σχετικής υγρασίας (%), ηλιακής και καθαρής ακτινοβολίας ($W \cdot m^{-2}$) ανά 11sec. Από αυτές τις μετρήσεις υπολογίζονται οι μέσες ωριαίες τιμές οι οποίες καταγράφονται σε αρχείο Η/Υ. Οι μετρήσεις έγιναν πάνω από καλά αρδευόμενη καλλιέργεια μηδικής (alfalfa).

Αποτελέσματα - συζήτηση

Α. Συσχετίσεις με την Penman (1963) VPD #3:

Ημερήσιες συσχετίσεις της εξατμισοδιαπνοής, όπως αυτή προκύπτει από τις διάφορες μεθόδους, γίνονται με τη σχέση Penman (1963) VPD #3, - διότι σύμφωνα με τους Jensen et al., (1990) είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος για τις κλιματικές συνθήκες της Κωπαϊδας - και παρουσιάζονται στο σχήμα 1 (α-η). Η εγγύτητα κάθε σημείου με την γραμμή των 45 μοιρών, για όλο το εύρος των τιμών της εξατμισοδιαπνοής, δείχνει την ολική ακρίβεια των εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής σε σχέση με τις εκτιμήσεις της Penman (1963) VPD #3, αλλά και το αν και κατά πόσο η κάθε μέθοδος υποεκτιμά ή υπερεκτιμά την ημερήσια εξατμισοδιαπνοή.



ΣΧΗΜΑ 1: Γραμμική συσχέτιση των διαφόρων Penman μορφών με την Penman (1963) VPD#3

Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ των μεθόδων έγινε με ημερήσιες τιμές για το Νοέμβριο του 1993, θεωρώντας την Penman (1963) VPD #3 ως εξαρτημένη μεταβλητή. Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε ήταν της μορφής $y = b \cdot x$ και όχι της μορφής $y = a + b \cdot x$, αφού πρέπει η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με τη Penman (1963) VPD #3 να είναι μηδέν, όταν η εκτίμηση της με οποιαδήποτε άλλη μέθοδο είναι μηδέν. Επίσης ο συντελεστής b μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να "διορθώσει" τις τιμές διαφόρων μεθόδων σε σχέση με αυτές της Penman (1963) VPD #3.

Για κάθε εξίσωση υπολογίστηκαν ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 , το τυπικό σφάλμα εκτίμησης SEE και το στατιστικό κριτήριο F. Το στατιστικό αυτό κριτήριο δείχνει εάν και σε ποιό βαθμό υπάρχει σημαντική συσχέτιση μεταξύ των μεθόδων. Οι συντελεστές γραμμικής παλινδρόμησης, ο συντελεστής προσδιορισμού (*coefficient of determination*) το τυπικό σφάλμα εκτίμησης και το κριτήριο F παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙ: Στατιστικά χαρακτηριστικά των γραμμικών συσχετίσεων των διαφόρων Penman μορφών με την Penman (1963) VPD#3

	Συντελεστής b	R^2	SEE (mm/day)	F-ratio	Κατάταξη
Μέθοδος 1 παραλλαγή I	0.989594	0.981837	0.217752	1459.56	5
Μέθοδος 1 παραλλαγή Ia	1.000771	0.980714	0.224383	1372.99	6
Μέθοδος 1 παραλλαγή Ib	1.012243	0.980707	0.224426	1372.45	7
Μέθοδος 1 παραλλαγή II	1.030247	0.985915	0.191758	1889.90	4
Μέθοδος 1 παραλλαγή III	0.880342	0.963483	0.308760	712.374	9
Μέθοδος 1 παραλλαγή IV	0.993678	0.998085	0.0707084	14071.2	3
Μέθοδος 2 παραλλαγή V	1.069623	0.998966	0.051960	26080.4	2
Μέθοδος 1 παραλλαγή VI	1.176081	0.971482	0.272855	919.768	8

Όπως είναι φανερό από τον πίνακα ΙΙ η αύξηση της ακρίβειας της εκτιμώμενης τιμής της εξατμισοδιαπνοής δεν εξαρτάται τόσο από την ακρίβεια υπολογισμού των παραμέτρων λ, e_s, Δ, όσο από άλλους παράγοντες.

Η χρήση των "χειρότερων" εξισώσεων υπολογισμού των παραμέτρων λ, e_a, Δ, οδηγεί σε εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής, οι οποίες είναι σαφώς χαμηλότερες (από 0.090 έως 0.786 $mm \cdot day^{-1}$) από αυτές που θα περίμενε κανείς χρησιμοποιώντας την F.A.O. - 24 Corrected Penman κάτω από τις οδηγίες της εργασίας των M. Smith et al. (1992). Παρά όμως τα σφάλματα υπολογισμού των τριών αυτών παραμέτρων, η εισαγωγή των εξισώσεων αυτών στην F.A.O. - 24 Corrected Penman, οδηγεί σε καλύτερες εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής από άλλες μεθόδους (όπως η ωριαία Penman και η μη διορθωμένη F.A.O. - 24 Penman).

Σε κάθε συσχέτιση που πραγματοποιήθηκε είχαμε: $F_{1,27;0.01} > F_{1,25;0.01} > F_{1,30;0.01}$ και συνεπώς υπάρχει σημαντική γραμμική συσχέτιση μεταξύ της Penman (1963) VPD #3 και των υπολοίπων μεθόδων, σε επίπεδο σημαντικότητας 0.01.

Πολύ αξιόπιστες εκτιμήσεις επίσης παρέχει η μέθοδος Penman (1963).Με αυτό το συμπέρασμα συμφωνούν οι Jensen et al. (1990) που αναφέρουν ότι η Penman (1963) VPD #3 "*... δεν βελτίωσε γενικά την απόδοση της αρχικής μεθόδου Penman (1963) και για το λόγο αυτό δεν συνιστάται.*".

Ο διορθωτικός συντελεστής c της μεθόδου F.A.O. - 24 Corrected Penman τείνει να μειώνει την υποεκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής από αυτή τη μέθοδο, δικαιώνοντας έτσι τους Doorenbos and Pruitt (1977). (Θα πρέπει εδώ να αναφερθεί πως ένα σφάλμα της τάξης περίπου του 4% θα είχε αποφευχθεί, αν είχαν εκλεγεί τιμές του πίνακα 16 του paper 24 του F.A.O. και δεν είχε γίνει προσπάθεια προσέγγισης της τιμής του συντελεστή από τη σχέση των Allen & Pruitt, 1991)

Στην F.A.O. - 24 Corrected Penman ο υπολογισμός των μέσων ημερήσιων τιμών των παραμέτρων από το σύνολο των τιμών οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα από ότι αν γινόταν από το ημιάθροισμα της μέγιστης - ελάχιστης ημερήσιας τιμής, της κάθε παραμέτρου.

Βιβλιογραφία

1. Bosen, J.F. (1960). «A formula for approximation of the saturation vapor pressure over water», Monthly Weather Rev. 88 (8):275-276
2. Brunt ,D. (1952). «Physical and dynamical meteorology», 2nd ed. University Press, Cambridge, 428 pp.
3. Burman, R.D., Jensen, M.E. and Allen, R.G. (1987). «Thermodynamic factors in evapotranspiration» 28-30. In James, L.G., and English, M.J. (eds.)., Proc. Irrig. and Drain. Spec. Conf., ASCE, Portland, Ore., July.
4. Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1977). «Guidelines for predicting crop water requirements», FAO Irrig. and Drain. paper No. 24, 2nd ed., FAO Rome Italy.
5. Frere, M., and Popov, G.F. (1979). «Agrometeorological crop monitoring and forecasting». FAO Plant Production and Protection Paper 17. FAO, Rome, Italy. 38-43.
6. Harrison, L.P. (1963). «Fundamental concepts and definitionsrelating to humidity», In:Humidity and Moisture, Vol. 3. Wexler A. (ed.) Reinhold Publishing Company, New York.
7. Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. (1990). «Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements», ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70.
8. Lowe, P.R. (1977). «An approximating polynomial for the computaion of saturation vapor pressure», J. Appl. Meteorol. 16:100-103
9. Mc Cumber, M.C. (1980). «A numerical simulation of the influence of heat and moisture fluxes upon mesoscale circulations», Rep. UVA-ENV SCI-MESO-1980-2, Dept. of Environmental Science, University of Virginia, 255pp.
10. Monteith, J.L. and Unsworth, M.H. (1990). «Principles of Environmental Physics», (2nd edn.), Arnold, London.
11. Paw U, K.T. (1991). «Applications of solutions to nonlinear energy budget equations», Agric. For. Meteorol., 43:121-145
12. Penman, H.L. (1963). «Vegetation and Hydrology», Tech. Com., No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England.
13. Saxton, K.E. (1972). «Watershed Evapotranspiration by the combination method», Unpublished
14. Smith, M., Allen, R.G, Monteith, J.L., Perrier, A., Pereira, L., and Segeren, A., 1991, «Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements», UN-FAO, Rome, Italy, 54 p.
15. Tetens, O. (1930). «Uber einige meteorologische Begrife», A. Geophys. 6:297-309
16. Van Wijk, W.R. (1966). «Physics of Plant Environment», 2nd edition, North Holland Publishing Company, Amsterdam
17. Wright, J.L. (1982). «New Evapotranspiration Crop Coefficients», ASCE, 108 (IR2), 73-74.