

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ PRIESTLEY-TAYLOR ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Δεμερτζή Κλεονίκη, Ασchonίτης Βασίλης, Παπαμιχαήλ Δημήτρης*

Εργαστήριο Γενικής και Γεωργικής Υδραυλικής και Βελτιώσεων, Γεωπονική Σχολή, 54124,
Α.Π.Θ.

*Στοιχεία επικοινωνίας: papamich@agro.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της εργασίας είναι η εύρεση του εποχιακού σφάλματος στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς ET_o με τη μέθοδο Priestley-Taylor (P-T) και ο επαναπροσδιορισμός του συντελεστή μεταγωγής a_{pt} χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Penman-Monteith κατά ASCE. Η ανάλυση έγινε για όλο τον ελλαδικό χώρο με χρήση GIS και μέσα μηνιαία κλιματικά δεδομένα της περιόδου 1950-2000. Η ανάλυση σφάλματος για το θερινό εξάμηνο Απριλίου-Σεπτεμβρίου έδειξε ότι η μέθοδος P-T παρουσιάζει αποδεκτές τιμές στο 75.3%, ενώ για το χειμερινό εξάμηνο Οκτωβρίου-Μαρτίου στο 20.2% της ελληνικής επικράτειας. Ο επαναπροσδιορισμός της μέσης τιμής του a_{pt} για το χειμερινό και θερινό εξάμηνο έδειξε ότι η χωρική μεταβλητότητά του παρουσιάζει συσχέτιση της τάξεως του ~94% με το έλλειμμα πίεσης κορεσμού υδρατμών. Από την ανάλυση της εποχιακής μεταβολής του συντελεστή a_{pt} εκτιμήθηκε η μέση τιμή του σε 1.29 και 1.51 για τη θερινή και χειμερινή περίοδο, αντίστοιχα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: ASCE Penman-Monteith, Priestley-Taylor, GIS, Ελλάδα.

ANALYSIS OF PRIESTLEY-TAYLOR METHOD FOR THE ASSESSMENT OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN GREECE

Demertzi Kleoniki, Aschonitis Vassilis, Papamichail Dimitris*

Laboratory of General and Agricultural Hydraulics and Land Reclamation, School of
Agriculture, 54124, A.U.Th.

*Corresponding author: papamich@agro.auth.gr

ABSTRACT

The aim of the study is to estimate the seasonal error in the assessment of reference crop evapotranspiration ET_o using the Priestley-Taylor (P-T) method and to revise the advection coefficient a_{pt} using as a base the ASCE standardized Penman-Monteith method. Analysis was performed for the Greek territory using GIS and gridded data which cover the mean monthly values of climatic parameters for the period 1950-2000. The analysis of seasonal error showed that P-T presents acceptable values in the 73.5% and 20.2% coverage of the greek territory for the dry-warm season (April-September) and the cold-wet season (October-March), respectively. Recalculation of a_{pt} for both seasons showed that its spatial variation is described at ~94% level by the vapor pressure deficit. The mean values of a_{pt} for the dry-warm season and the cold-wet season were found to be 1.29 και 1.51, respectively.

KEY WORDS: ASCE Penman-Monteith, Priestley-Taylor, GIS, Greece.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ή δυνητική εξατμισοδιαπνοή ET_o αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους για τον προσδιορισμό του υδατικού ισοζυγίου σε επίπεδο λεκάνης απορροής και για τον προσδιορισμό των αρδευτικών αναγκών σε επίπεδο αγρού. Για την εκτίμηση της ET_o έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι, όπως η μέθοδος Penman (1948,1956), η Blaney-Criddle (1950), η τροποποιημένη Blaney-Criddle κατά FAO-24 (Doorembos and Pruitt, 1977), η Priestley-Taylor (1972), η τροποποιημένη FAO-24 (Allen and Pruitt, 1991), η Kimberly Penman (Wright, 1982), η CIMIS Penman (Snyder and Pruitt, 1985), η Shuttleworth and Wallace (1985), η Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1982, 1985), η FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998) και η ASCE-standardized Penman-Monteith (Allen et al., 2005), με τις δύο τελευταίες να αποτελούν τις ακριβέστερες μεθόδους. Επίσης, έχει παρουσιαστεί πληθώρα εμπειρικών μη γραμμικών εξισώσεων τοπικής εμβέλειας, οι οποίες έχουν προκύψει με παλινδρόμηση σε μετρήσεις από λυσίμετρα ή με προσαρμογή στις παραπάνω εξισώσεις. Αναλυτική ανασκόπηση των μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς δίνεται από τον Παπαζαφειρίου (1999).

Σημαντικές εργασίες εφαρμογής και ανάλυσης της εξατμισοδιαπνοής σε ελληνικές συνθήκες έχουν παρουσιαστεί από τους Παπαμιχαήλ κ.ά. (1994), Papamichail and Terzidis (1996), Kotsopoulos and Babajimopoulos (1997), Παπαμιχαήλ και Γεωργίου (1999), Γεωργίου κ.ά. (2000), Anadranistakis et al. (2000), Dalezios et al. (2002), Loukas et al. (2005), Ampas et al. (2007) και Aschonitis et al. (2012), οι οποίοι ασχολήθηκαν με τον υπολογισμό και την ανάλυση ευαισθησίας των διαφόρων παραμέτρων και του χρονικού βήματος των παραπάνω μεθόδων για δεδομένα από διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας. Οι Alexandris and Kerkididis (2003) και Alexandris et al. (2006) ανέπτυξαν ένα νέο εμπειρικό μοντέλο “Corpais model” για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς, ενώ ο Valiantzas (2006) ανέπτυξε εμπειρικά μοντέλα μειωμένων παραμέτρων.

Η μέθοδος των Priestley-Taylor αποτελεί μια από τις απλούστερες και ακριβέστερες μεθόδους, καθώς απαιτεί δεδομένα μόνο θερμοκρασίας και ακτινοβολίας. Η εξίσωση περιλαμβάνει ένα διορθωτικό συντελεστή, ο οποίος είναι γνωστός και ως συντελεστής μεταγωγής a_{pt} (advection coefficient). Η τιμή του συντελεστή a_{pt} λαμβάνεται συνήθως ίση με 1.26 (Priestley and Taylor, 1972), με σύνηθες εύρος μεταξύ 1.08 και 1.34 (Tateishi and Ahn, 1996, Xu et al., 2013). Έρευνες σε διάφορες κλιματικές συνθήκες έχουν δείξει ότι ο συντελεστής a_{pt} παρουσιάζει μεγάλη χωρική και χρονική μεταβλητότητα (Moges et al., 2003, Pereira, 2004). Οι Weiß and Menzel (2008) έχουν χρησιμοποιήσει την τιμή 1.26 για υγρά και την τιμή 1.75 για ξηρά κλιματικά περιβάλλοντα, για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής σε παγκόσμια κλίμακα. Η τιμή $a_{pt}=1.26$ έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά για γυμνό αρδευόμενο έδαφος (Eichinger et al., 1996). Θεωρητικές προσομοιώσεις για την περίπτωση της καλλιέργειας αναφοράς σε κορεσμένο έδαφος επιβεβαίωσαν την τιμή αυτή μόνο υπό συνθήκες περιορισμένης μεταγωγής (non-advective conditions) (Lhomme, 1997, McMahon et al., 2013). Μικρές τιμές του συντελεστή ~ 1.14 έχουν αναφερθεί από τους Singh and Irmak (2011) για την περιοχή της Nebraska (USA), ενώ μεγάλες τιμές μεταξύ 1.82-2.14 έχουν αναφερθεί για ψυχρές-ξηρές περιοχές του Ιράν (Tabari and Talaei, 2011). Οι Castellvi et al. (2001) χρησιμοποιώντας μετρήσεις πεδίου από περιοχές της βόρειας Ισπανίας διαπίστωσαν σημαντική εποχιακή μεταβλητότητα του συντελεστή (μέχρι 27 %) και χωρική μεταβλητότητα με εύρος τιμών μεταξύ 1.35 και 1.67.

Στόχος της εργασίας είναι η εύρεση του εποχιακού σφάλματος στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς ET_o με τη μέθοδο Priestley-Taylor (P-T) χρησιμοποιώντας τη δοθείσα τιμή $a_{pt} = 1.26$ (Priestley and Taylor, 1972), καθώς και ο επαναπροσδιορισμός του συντελεστή μεταγωγής a_{pt} χρησιμοποιώντας ως βάση τη μέθοδο Penman-Monteith κατά ASCE. Η ανάλυση έγινε για όλο τον ελλαδικό χώρο με χρήση GIS

και δεδομένα, τα οποία παράχθηκαν από παγκόσμιας κλίμακας κλιματικά μοντέλα και καλύπτουν μέσες μηνιαίες τιμές κλιματικών παραμέτρων για την περίοδο 1950-2000.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

2.1.1 Η μέθοδος Penman-Monteith κατά ASCE

Η εξίσωση των Penman-Monteith κατά ASCE, η οποία προτάθηκε από την ASCE-EWRI Task Committee (Allen et al., 2005), αποτελεί βελτίωση της εξίσωσης κατά FAO-56 (Allen et al., 1998). Ο υπολογισμός της σε ημερήσιο χρονικό βήμα γίνεται για δύο τύπους καλλιέργειας αναφοράς (χαμηλή και υψηλή καλλιέργεια αναφοράς) και δίνεται από τη σχέση (Allen et al., 2005):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma u_2(e_s - e_a)C_n}{(T_{\text{mean}} + 273.16)}}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (2.1)$$

όπου ET_o : η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (mm d^{-1}), R_n : η καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), u_2 : η ταχύτητα ανέμου στα 2 m από την επιφάνεια του εδάφους (m s^{-1}), T_{mean} : η μέση ημερήσια θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$), G : η κατακόρυφη ροή ενέργειας από το έδαφος που μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμική ενέργεια ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), e_s : η πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa), e_a : η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa), Δ : η κλίση της καμπύλης στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών και θερμοκρασίας ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : η ψυχρομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), C_n : ο συντελεστής του τύπου της καλλιέργειας αναφοράς και C_d : ο συνδυαστικός συντελεστής επίδρασης αεροδυναμικής αντίστασης λόγω πυκνότητας και ύψους της φυτοκάλυψης της καλλιέργειας αναφοράς. Η χαμηλή καλλιέργεια αναφοράς αντιστοιχεί σε γρασίδι ύψους 12 cm και αεροδυναμικής αντίστασης 70 s m^{-1} , όπου οι συντελεστές C_n και C_d παίρνουν τιμές 900 και 0.34, αντίστοιχα. Για την περίπτωση αυτή, η εξίσωση (2.1) όταν υπολογίζεται σε ημερήσιο χρονικό βήμα, είναι όμοια με τη δοθείσα εξίσωση κατά FAO-56 (Allen et al., 1998). Η υψηλή καλλιέργεια αναφοράς αντιστοιχεί σε γρασίδι ύψους 50 cm και αεροδυναμικής αντίστασης 45 s m^{-1} , όπου οι συντελεστές C_n και C_d παίρνουν τιμές 1600 και 0.38, αντίστοιχα (Allen et al., 2005). Στην παρούσα εργασία, η συγκριτική ανάλυση γίνεται μόνο με τη μέθοδο χαμηλής καλλιέργειας αναφοράς.

2.1.2 Η μέθοδος Priestley-Taylor

Η μέθοδος των Priestley and Taylor (1972) υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή χαμηλής καλλιέργειας αναφοράς σύμφωνα με τη σχέση:

$$ET_o = a_{pt} \frac{\Delta}{\lambda(\Delta + \gamma)} (R_n - G) \quad (2.2)$$

όπου ET_o : η εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς (mm d^{-1}), R_n : η καθαρή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G : η κατακόρυφη ροή ενέργειας από το έδαφος που μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμική ενέργεια ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), Δ : η κλίση της καμπύλης στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών και θερμοκρασίας ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ : η ψυχρομετρική σταθερά ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), λ : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (MJ kg^{-1}) και a_{pt} : ο συντελεστής μεταγωγής (advection coefficient) των Priestley-Taylor.

2.1.3 Σχέσεις εκτίμησης των παραμέτρων των μεθόδων εξατμισοδιαπνοής

Ο υπολογισμός των παραμέτρων των εξισώσεων (2.1) και (2.2) μπορεί να επιτευχθεί με

σχέσεις, οι οποίες παρουσιάζουν παραλλαγές ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των δεδομένων. Πλήρης οδηγός για την επιλογή και χρήση αυτών των σχέσεων δίνεται από τους Παπαζαφειρίου (1999), Allen et al. (1998, 2005). Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό των παραμέτρων των δύο μεθόδων εξατμισοδιαπνοής, δίνονται στη συνέχεια.

Η πίεση κορεσμού υδρατμών e_s (kPa) υπολογίζεται από τη σχέση (Allen et al., 2005):

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{\max}) + e^{\circ}(T_{\min})}{2} \quad (2.3)$$

όπου
$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right) \quad (2.4)$$

Στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός της πραγματικής πίεσης υδρατμών e_a γίνεται με βάση τα δεδομένα της ειδικής υγρασίας q των Sheffield et al. (2006). Η σχέση που συνδέει τις δύο παραμέτρους, είναι των Peixoto and Oort (1996), της οποίας η μορφή είναι η εξής (Willet et al., 2008):

$$q = 1000 \left[\frac{\varepsilon e_a}{P - (1 - \varepsilon)e_a} \right] \quad (2.5)$$

όπου q : η ειδική υγρασία (g kg^{-1}), ε : ο λόγος των μοριακών βαρών υδρατμών/ξηρού αέρα ($\varepsilon=0.622$), P : η ατμοσφαιρική πίεση (kPa). Η εξίσωση επιλύθηκε ως προς e_a σε kPa και μετασχηματίστηκε για να λάβει τις κατάλληλες μονάδες ως εξής:

$$e_a = \frac{1000qP}{622 + 378q} \quad (2.6)$$

όπου q : η ειδική υγρασία (kg kg^{-1}) και P : η ατμοσφαιρική πίεση (kPa).

Η κλίση της καμπύλης στη σχέση πίεσης κορεσμού υδρατμών και θερμοκρασίας, Δ ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta = \frac{2503 \exp\left(\frac{17.27 T_{\text{mean}}}{T_{\text{mean}} + 237.3}\right)}{(T_{\text{mean}} + 237.3)^2} \quad (2.7)$$

όπου T_{mean} : η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$).

Η ψυχομετρική σταθερά γ ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma = \frac{P c_p}{\varepsilon \lambda} \quad (2.8)$$

όπου c_p : η ειδική θερμότητα αέρα υπό σταθερή πίεση με τιμή $1.013 \times 10^3 \text{ MJ kg}^{-1} ^{\circ}\text{C}^{-1}$, P : η ατμοσφαιρική πίεση (kPa), λ : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης ($\sim 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$) και ε : ο λόγος των μοριακών βαρών υδρατμών/ξηρού αέρα ($\varepsilon=0.622$).

Η παράμετρος P που εμφανίζεται στις εξισώσεις (2.5), (2.6) και (2.8), αφορά τη μέση ατμοσφαιρική πίεση της τοποθεσίας, η οποία δίνεται από την απλοποιημένη μορφή της παγκόσμιας εξίσωσης αερίων (Burman et al., 1987):

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (2.9)$$

όπου P : η μέση ατμοσφαιρική πίεση (kPa) και z : το υψόμετρο της περιοχής από την επιφάνεια της θάλασσας (m). Η εποχιακή διακύμανση της ατμοσφαιρικής πίεσης δεν λαμβάνεται υπόψη, καθώς το σφάλμα είναι αμελητέο. Για παράδειγμα στον υπολογισμό της πραγματικής πίεσης κορεσμού υδρατμών, το σφάλμα είναι της τάξης του 0.1% για αντίστοιχη μεταβολή της πίεσης κατά 1 hPa (Willet et al., 2008).

Η διόρθωση της ταχύτητας ανέμου στα δύο μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους, u_2 , δίνεται από τη σχέση:

$$u_2 = u_{zw} \frac{4.87}{\ln(67.8z_w - 5.42)} \quad (2.10)$$

όπου z_w : το υψόμετρο από την επιφάνεια του εδάφους (m), στο οποίο έχει ληφθεί η μέτρηση της ταχύτητας ανέμου u_{zw} (m s^{-1}).

Η κατακόρυφη ροή ενέργειας από το έδαφος, G , που μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμική ενέργεια λαμβάνεται ίση με μηδέν, όταν ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής γίνεται σε ημερήσιο βήμα. Η παραδοχή αυτή γίνεται λόγω των μικρών διαφοροποιήσεων της θερμοκρασίας εδάφους μεταξύ δύο διαδοχικών ημερών, οι οποίες μετρώνται την ίδια ώρα (Allen et al., 2005).

Η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία R_n ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) δίνεται από την εξίσωση:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2.11)$$

όπου R_{ns} : η καθαρή ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) και R_{nl} : η καθαρή ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

Η παράμετρος R_{ns} ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{ns} = (1-a)R_s \quad (2.12)$$

όπου R_s : η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) και a : η μέση σταθερά ανάκλασης (albedo) πλήρους κάλυψης από χορτοτάπητα, με τιμή 0.23 (αδιάστατο).

Η παράμετρος R_{nl} ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{nl} = \sigma f_{cd} \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \frac{T_{K \max}^4 + T_{K \min}^4}{2} \quad (2.13)$$

όπου σ : η σταθερά Stefan-Boltzman με τιμή 4.901×10^{-9} ($\text{MJ K}^{-4} \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$), e_a : η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa), $T_{K \max}$ και $T_{K \min}$: η μέγιστη και η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία ($^{\circ}\text{K}$) ($^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.16$) και f_{cd} : η συνάρτηση νεφοκάλυψης, η οποία παίρνει τιμές στο διάστημα $0.05 \leq f_{cd} \leq 1.0$ (αδιάστατη) και δίνεται από την εξίσωση:

$$f_{cd} = 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \quad (2.14)$$

όπου R_s : η μέση ημερήσια προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) και R_{so} : η μέση ημερήσια μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία ολικής αιθρίας ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) με $0.3 \leq R_s/R_{so} \leq 1.0$.

Η μέση ημερήσια μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία ολικής αιθρίας R_{so} ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) δίνεται από την εξίσωση:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (2.15)$$

όπου z : το υψόμετρο σε m και R_a : η μέση ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

Η εξωγήινη ακτινοβολία R_a ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), η οποία ορίζεται ως η μικρού μήκους ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στον ανώτερο όριο της ατμόσφαιρας, αποτελεί μία σταθερά μεταβαλλόμενη παράμετρο κατά τη διάρκεια του έτους και δίνεται από την εξίσωση:

$$R_a = \frac{24 G_{sc} d_r}{\pi} (\omega_s \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s) \quad (2.16)$$

όπου G_{sc} : η ηλιακή σταθερά ($\approx 4.92 \text{ MJ m}^2 \text{h}^{-1}$), ϕ : το γεωγραφικό πλάτος (rad), δ : η κλίση του ήλιου (rad), d_r : η σχετική απόσταση γης-ηλίου και ω_s : η γωνία της ώρας δύσης του ηλίου (rad). Οι παράμετροι ϕ , δ και d_r δίνονται αντίστοιχα από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\phi = \frac{\pi}{180} \times LAT \quad (2.17)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left(\frac{2\pi J}{365} - 1.39 \right) \quad (2.18)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos(2\pi J/365) \quad (2.19)$$

όπου J : ο αριθμός της ημέρας του έτους και LAT : το γεωγραφικό πλάτος σε δεκαδικές μοίρες.

Η γωνία της ώρας δύσης του ηλίου ω_s δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan \left[\frac{-\tan \varphi \cdot \tan \delta}{X^{0.5}} \right] \quad (2.20\alpha)$$

$$\text{όπου } X = 1 - [\tan \varphi]^2 \cdot [\tan \delta]^2, \text{ αν } X \leq 0, \text{ τότε } X = 0.00001 \quad (2.20\beta)$$

2.1.4 Επαναπροσδιορισμός του συντελεστή των Priestley-Taylor

Ο επαναπροσδιορισμός της μέσης μηνιαίας τιμής του συντελεστή των Priestley-Taylor στον ελλαδικό χώρο έγινε χρησιμοποιώντας τις υπολογισμένες μέσες μηνιαίες τιμές της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς κατά ASCE, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$a_{pt} = (ET_o)_{ASCE} \times \frac{\lambda(\Delta + \gamma)}{\Delta(R_n - G)} \quad (2.21)$$

Επιπλέον ανάλυση έγινε με στόχο το συσχετισμό του επαναπροσδιορισμένου συντελεστή με διάφορες παραμέτρους, όπως το έλλειμμα πίεσης κορεσμού υδρατμών $de = e_s - e_a$ και η ταχύτητα του ανέμου, οι οποίες δεν συμμετέχουν στην εξίσωση των Priestley-Taylor. Η ανάλυση έγινε με το λογισμικό SPSS Statistics 17.0.

2.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η ανάλυση των κλιματικών παραμέτρων στην ελληνική επικράτεια έγινε με χρήση GIS (ArcGIS 9.3) συνδυάζοντας διάφορες βάσεις δεδομένων και λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητά τους, καθώς και τη μέγιστη χωρική και χρονική ανάλυσή τους. Η πρώτη βάση που χρησιμοποιήθηκε, είναι των Hijmans et al. (2005), η οποία παρέχει τη μέγιστη χωρική ανάλυση (30 arc-sec, ~1 km) μέσω μηνιαίων τιμών της μέγιστης, ελάχιστης, μέσης θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης για την περίοδο 1950-2000.

Η δεύτερη βάση που χρησιμοποιήθηκε, είναι των Sheffield et al. (2006), η οποία παρέχει μηνιαίες τιμές των παραμέτρων βροχόπτωσης, θερμοκρασίας, προσπίπτουσας μικρού και μεγάλου μήκους ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμου στα 10 m από την επιφάνεια του εδάφους και ειδικής υγρασίας για την χρονική περίοδο 1948-2006, με ανάλυση 0.5 degrees.

Για τις παραμέτρους της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε η πρώτη βάση, ενώ για τις υπόλοιπες παραμέτρους χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη βάση, της οποίας οι παράμετροι μετασχηματίστηκαν σε μορφή raster και επαναπροσδιορίστηκαν με τη μέθοδο bilinear resampling για το μετασχηματισμό τους σε ανάλυση 1 km.

Το raster υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για τη χωρική ανάλυση των μέσων μηνιαίων κλιματικών δεδομένων, είναι το GTOPO30 με ανάλυση στο 1 km (<https://earthdata.nasa.gov>).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ASCE ΚΑΙ PRIESTLEY-TAYLOR

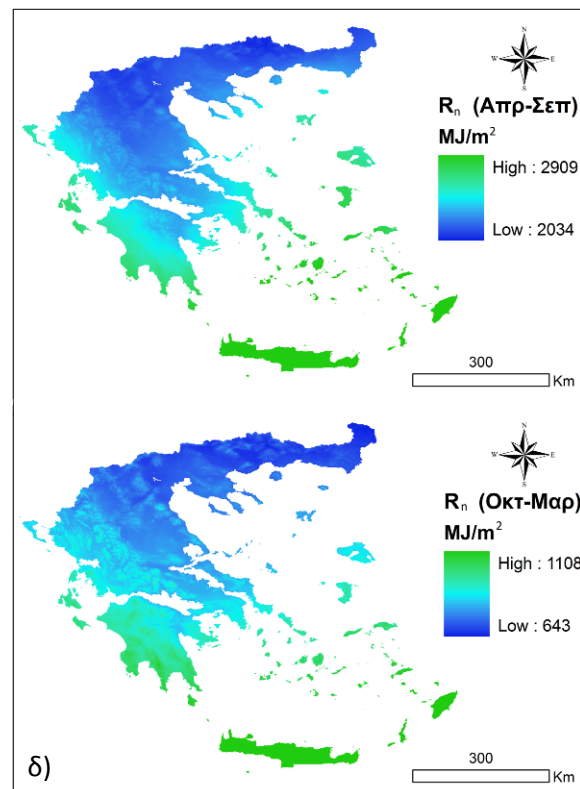
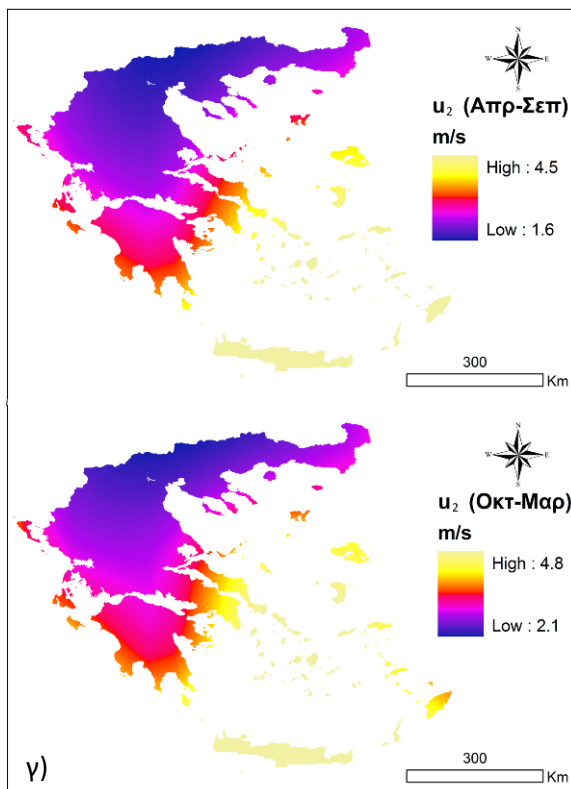
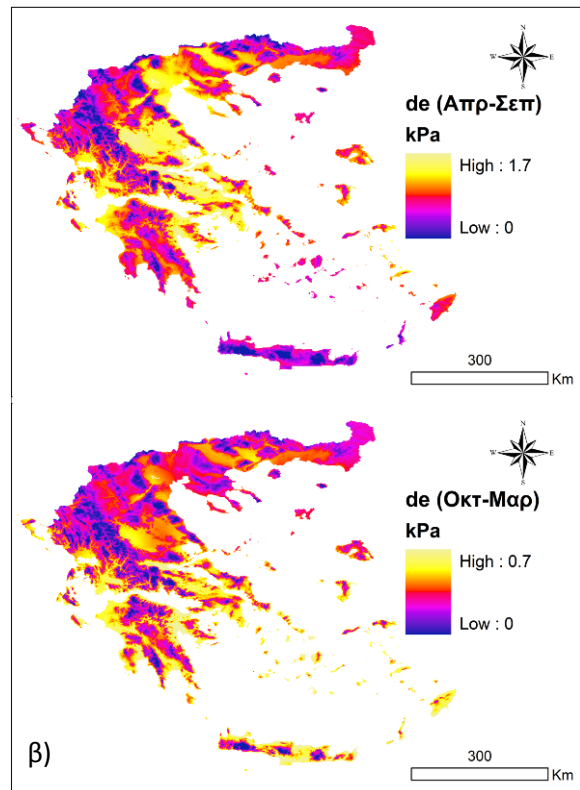
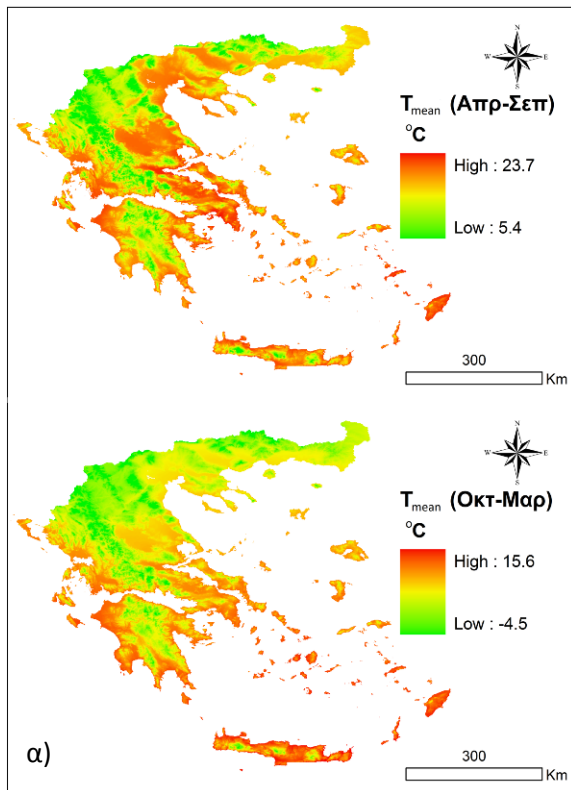
Με βάση τα δεδομένα που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.2, παράχθηκαν 12 χάρτες σε μορφή raster με ανάλυση 1 km για τις μέσες ημερήσιες τιμές κάθε μήνα όλων των κλιματικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με βάση τις μεθόδους της ενότητας 2.1. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται επιλεκτικά οι χάρτες της μέσης θερμοκρασίας T_{mean} ($^{\circ}\text{C}$), του μέσου ελλείμματος πίεσης κορεσμού de (kPa), της μέσης ταχύτητας του ανέμου u_2 (m s^{-1}) και της μέσης καθαρής ακτινοβολίας R_n (MJ m^{-2}) του θερινού (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) και χειμερινού εξαμήνου (Οκτώβριος-Μάρτιος) για όλη την ελληνική επικράτεια, για την περίοδο 1950-2000.

Τα αποτελέσματα της μέσης ET_o (mm) θερινού και χειμερινού εξαμήνου της περιόδου 1950-2000 για τη μέθοδο ASCE και P-T με $a_{pt}=1.26$ δίνονται στα Σχήματα 2α και 2β, αντίστοιχα. Με βάση τα αποτελέσματα της ET_o των δύο μεθόδων, εκτιμήθηκε το % σφάλμα της μεθόδου P-T σε σχέση με την ASCE για τη χειμερινή και εαρινή περίοδο και δίνεται στο Σχήμα 2γ. Στους χάρτες ανάλυσης σφάλματος χρησιμοποιήθηκαν τρεις κλάσεις περιοχών α) με σφάλμα $<-10\%$ (υποεκτίμηση), β) με σφάλμα μεταξύ -10 και 10% (σχετική συμφωνία των δύο μεθόδων, αποδεκτό σφάλμα) και γ) με σφάλμα $>10\%$ (υπερεκτίμηση). Λαμβάνοντας υπόψη το χάρτη σφάλματος του θερινού εξαμήνου (Σχήμα 2γ), η P-T υπερεκτιμά την ET_o κυρίως σε περιοχές μεγάλου υψόμετρου, αλλά και σε πεδινές περιοχές της Κρήτης, στα Δωδεκάνησα και στα νησιά νότια των Κυκλάδων (11.1% της ελληνικής επικράτειας), ενώ υποεκτιμά την ET_o σε περιοχές της Θεσσαλίας, Αττικής, ανατολικής Στερεάς Ελλάδας και ανατολικής Πελοποννήσου (13.6% της ελληνικής επικράτειας). Αποδεκτές τιμές σφάλματος εμφανίζονται περίπου στο 75.3% της ελληνικής επικράτειας. Λαμβάνοντας υπόψη το χάρτη σφάλματος του χειμερινού εξαμήνου (Σχήμα 2γ), η P-T υπερεκτιμά την ET_o στο σύνολο των ορεινών περιοχών (18.9% της ελληνικής επικράτειας), ενώ την υποεκτιμά σχεδόν σε όλο το σύνολο των πεδινών περιοχών (58.9% της ελληνικής επικράτειας). Αποδεκτές τιμές σφάλματος εμφανίζονται στο 20.2% της ελληνικής επικράτειας και κυρίως στις ζώνες μετάβασης μεταξύ ορεινών και πεδινών περιοχών.

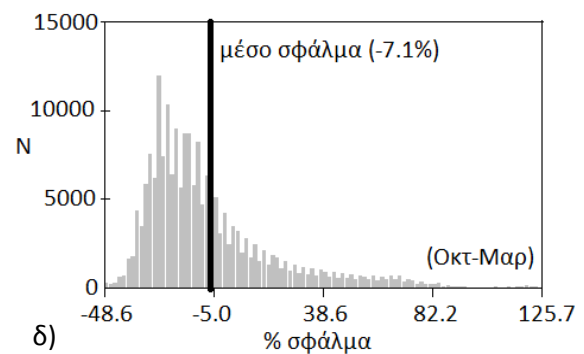
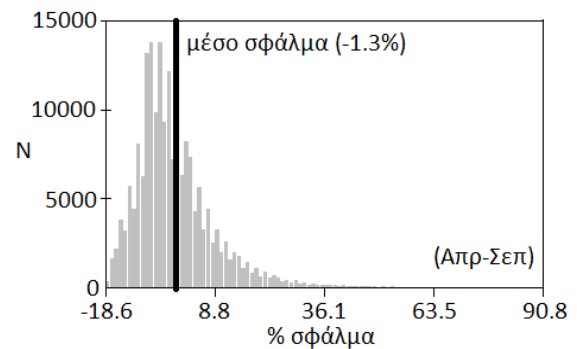
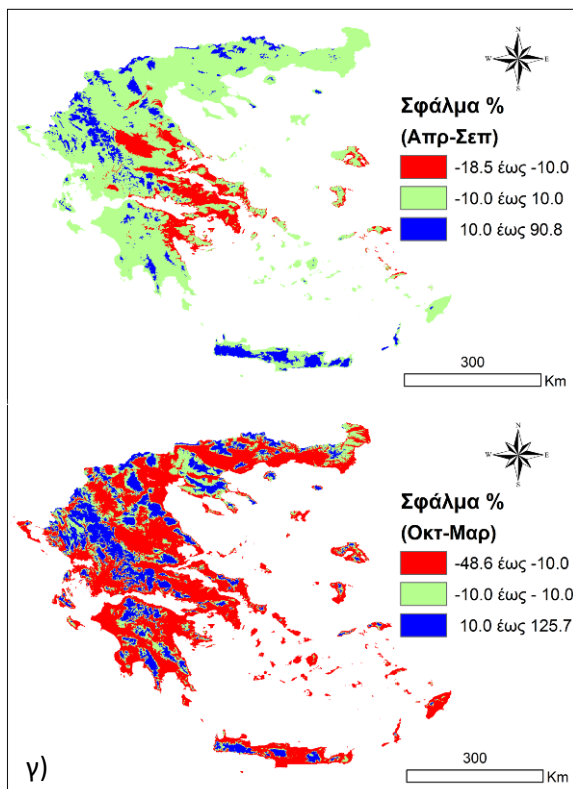
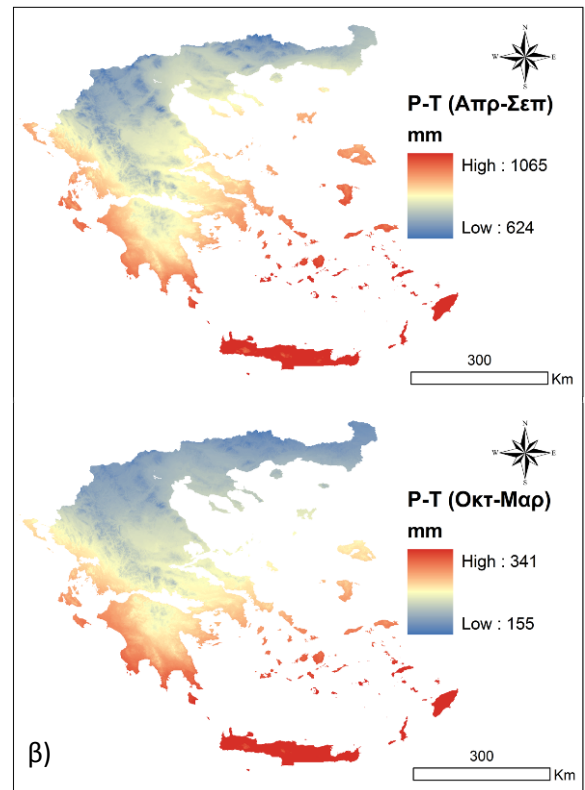
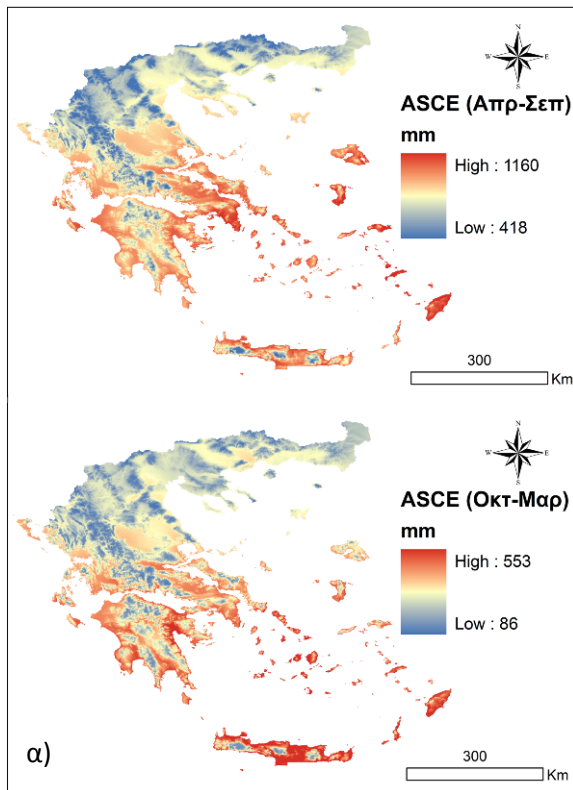
Ανάλυση συχνότητας του απεικονιζόμενου σφάλματος του Σχήματος 2γ, τόσο για τη θερινή όσο και για τη χειμερινή περίοδο, έγινε λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των 193129 εικονοστοιχείων (pixels) ανάλυσης 1×1 km, που καλύπτουν την ελληνική επικράτεια (Σχήμα 2δ). Η ανάλυση έδειξε ότι το μέσο % σφάλμα της P-T συγκριτικά με την ASCE για όλη την Ελλάδα είναι της τάξης του -1.3% και του -7.1% για το θερινό και χειμερινό εξάμηνο, αντίστοιχα (Σχήμα 2δ). Αντίστοιχη ανάλυση σε μηνιαίο χρονικό βήμα έδειξε ότι το μέσο % σφάλμα για όλη την Ελλάδα είναι θετικό κατά την περίοδο Μαρτίου-Ιουλίου και αρνητικό κατά την περίοδο Αυγούστου-Φεβρουαρίου με τις μεγαλύτερες τιμές σφάλματος να παρατηρούνται κατά τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες (Σχήμα 3).

3.2 ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ PRIESTLEY-TAYLOR

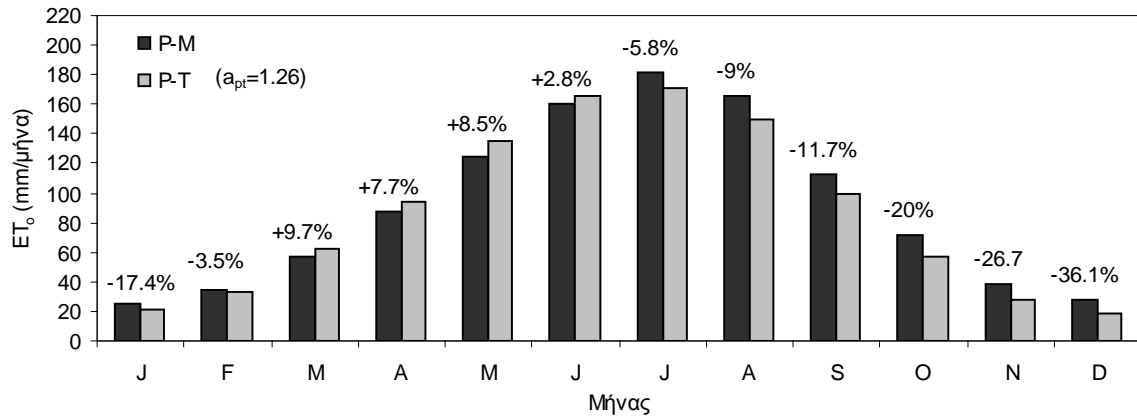
Ο επαναπροσδιορισμός του συντελεστή Priestley-Taylor έγινε με χρήση της εξίσωσης (2.21) και οι μέσες τιμές του για το θερινό και χειμερινό εξάμηνο της περιόδου 1950-2000, για την ελληνική επικράτεια, δίνονται στο Σχήμα 4α. Λαμβάνοντας υπόψη το χάρτη του συντελεστή a_{pt} για το θερινό εξάμηνο παρατηρήθηκε ότι παρουσιάζει τιμές <1.1 σε περιοχές μεγάλου υψόμετρου, οι οποίες χαρακτηρίζονται από μικρές τιμές ελλείμματος πίεσης κορεσμού υδρατμών de (υγρές περιοχές), ενώ οι τιμές του συντελεστή στις πεδινές περιοχές παρουσιάζουν ένα εύρος τιμών μεταξύ 1.1-1.56, όπου και σε αυτή την περίπτωση η χωρική μεταβλητότητα της τιμής του a_{pt} είναι ανάλογη της παραμέτρου de . Το παρατηρούμενο εύρος για την περίπτωση των πεδινών περιοχών είναι σε συμφωνία με τις δοθείσες τιμές των Castellvi et al. (2001) για πεδινές περιοχές της Ισπανίας με παρόμοιες κλιματικές συνθήκες. Λαμβάνοντας υπόψη το χάρτη τιμών του συντελεστή a_{pt} για το χειμερινό εξάμηνο, παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής παρουσιάζει τιμές <1.1 και πάλι σε περιοχές μεγάλου υψόμετρου λόγω των μικρών τιμών της παραμέτρου de , ενώ οι τιμές του συντελεστή στις πεδινές περιοχές είναι αυξημένες σε σχέση με το θερινό εξάμηνο και παρουσιάζουν ένα εύρος τιμών μεταξύ 1.1 και 2.74, όπου και σε αυτή την περίπτωση η χωρική μεταβλητότητα της τιμής του a_{pt} είναι ανάλογη της παραμέτρου de .



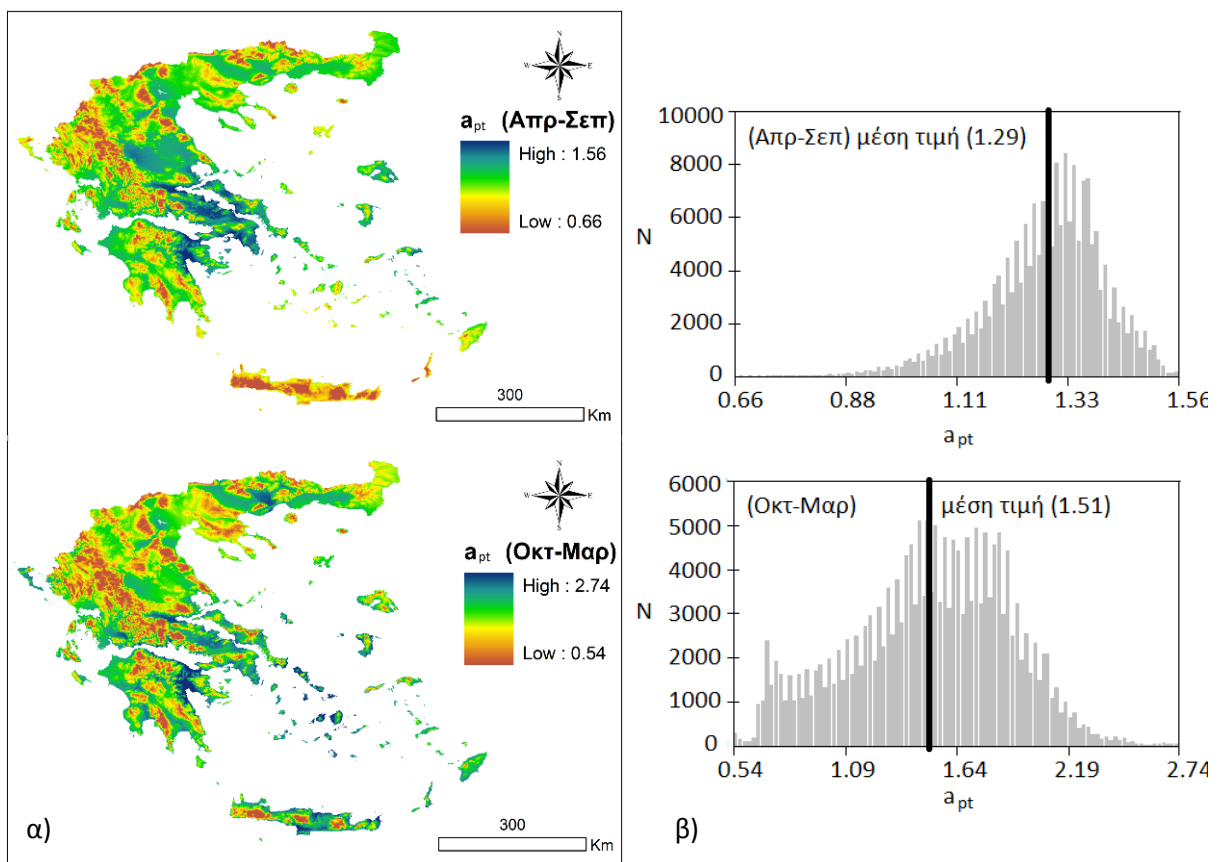
Σχήμα 1: α) Μέση θερμοκρασία T_{mean} ($^{\circ}\text{C}$) εξαμήνου Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου, β) Μέσο έλλειμμα πίεσης κορεσμού υδρατμών de (kPa) εξαμήνου Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου, γ) Μέση ταχύτητα ανέμου u_2 (m s^{-1}) εξαμήνου Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου, δ) Καθαρή ακτινοβολία R_n (MJ m^{-2}) εξαμήνου Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου.



Σχήμα 2: α) ET_o (mm) κατά ASCE εξαμήνου Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου, β) ET_o (mm) κατά Priestley-Taylor εξαμήνου Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου για $a_{PT}=1.26$, γ) Μέσο % σφάλμα της σχέσης Priestley-Taylor συγκριτικά με την ASCE για τις περιόδους Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου και δ) Ανάλυση συχνότητας σφάλματος για τις περιόδους Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου (N: αριθμός εικονοστοιχείων).



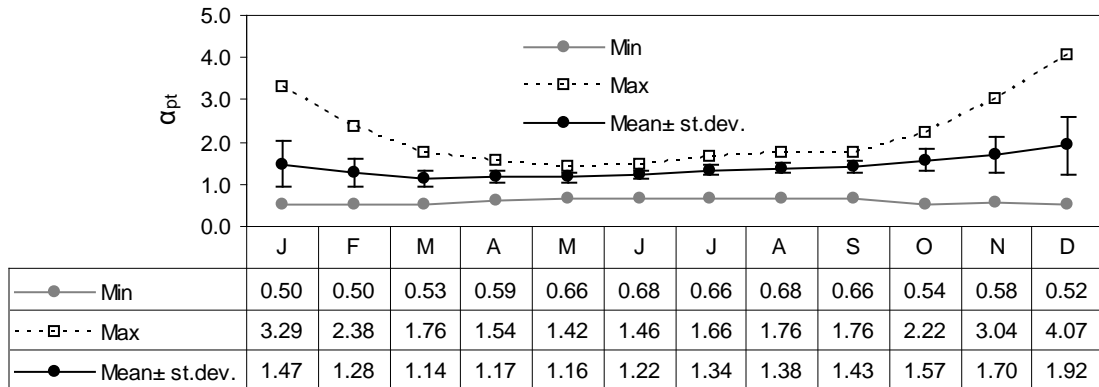
Σχήμα 3: Μέσο μηνιαίο σφάλμα της εξίσωσης των Priestley-Taylor (P-T) για $a_{pt}=1.26$ συγκριτικά με την εξίσωση Penman-Monteith κατά ASCE (P-M).



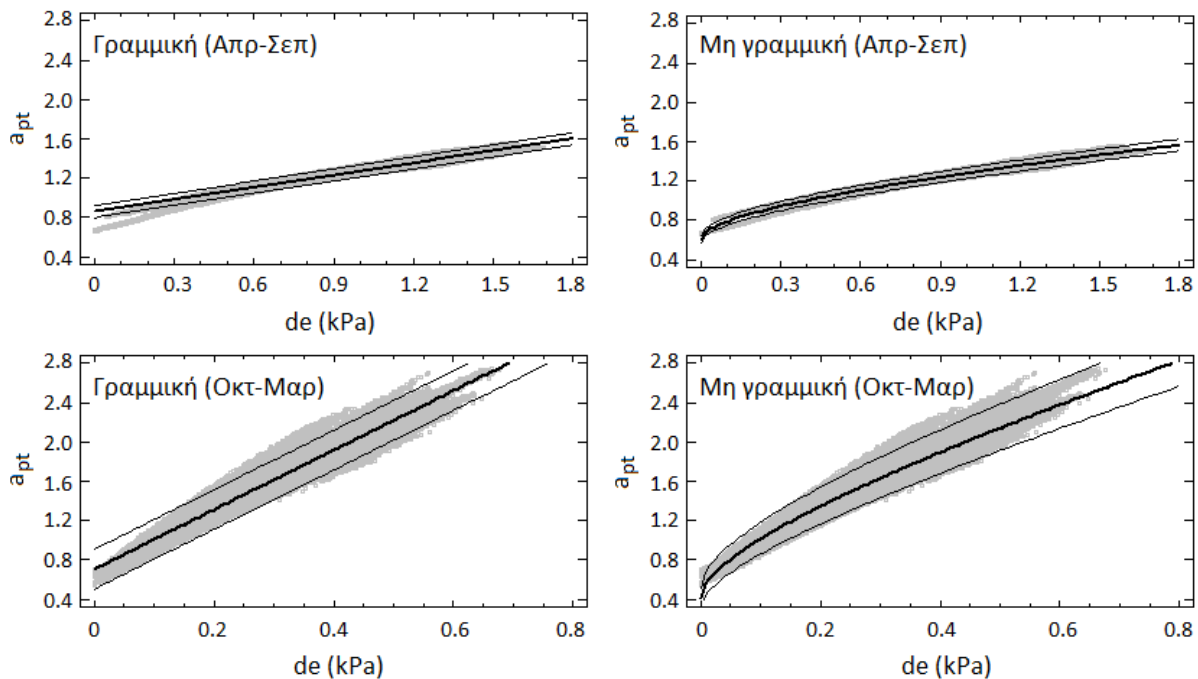
Σχήμα 4: α) Μέση τιμή του συντελεστή a_{pt} εξαμήνου Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου, β) Ανάλυση συχνότητας μέσων τιμών εξαμήνου του συντελεστή a_{pt} για τις περιόδους Απριλίου-Σεπτεμβρίου και Οκτωβρίου-Μαρτίου (N: αριθμός εικονοστοιχείων).

Από την ανάλυση συχνότητας των τιμών του συντελεστή a_{pt} από 193129 εικονοστοιχεία (Σχήμα 4β), εκτιμήθηκε η μέση τιμή του σε 1.29 και 1.51 για τη θερινή και χειμερινή περίοδο, αντίστοιχα. Για την καλύτερη κατανόηση των διαφοροποιήσεων του συντελεστή μεταξύ θερινής και χειμερινής περιόδου δίνονται και οι μηνιαίες τιμές του στο Σχήμα 5, από το οποίο προκύπτει σαφής αύξηση του συντελεστή κατά τους χειμερινούς μήνες (Οκτώβριος-Μάρτιος), ειδικά στις ξηρές πεδινές περιοχές. Η μεταβλητότητα της μέσης μηνιαίας τιμής του συντελεστή για όλη την ελληνική επικράτεια είναι εντονότερη κατά τη χειμερινή περίοδο (1.14-1.92), ενώ κατά τη θερινή περίοδο δεν είναι τόσο ευμετάβλητη (1.17-1.43) (Σχήμα 5).

Μηνιαίες τιμές του συντελεστή μεγαλύτερες από 2.5 παρατηρήθηκαν σε ελάχιστα εικονοστοιχεία (κάτω του 5% της ελληνικής επικράτειας) κατά την περίοδο Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου, οι οποίες οφείλονται κατά κύριο λόγο στις πολύ μικρές υπολογισμένες τιμές της ET_o (για τιμές $ET_o < 0.5 \text{ mm d}^{-1}$). Τιμές του συντελεστή < 1 παρατηρήθηκαν σε περιοχές με τιμές $de < 0.25 \text{ kPa}$, ανεξαρτήτως εποχής.



Σχήμα 5: Μέγιστη, ελάχιστη και μέση μηνιαία τιμή του συντελεστή a_{pt} στον ελλαδικό χώρο.



Σχήμα 6: Σχέση a_{pt} και de για τη θερινή (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) και τη χειμερινή περίοδο (Οκτώβριος-Μάρτιος) για δύο περιπτώσεις συσχέτισης (γραμμική και μη γραμμική \pm όρια εμπιστοσύνης στο 95%) με βάση τα δεδομένα 193129 εικονοστοιχείων.

Από τη στατιστική ανάλυση συσχέτισης του συντελεστή a_{pt} με διάφορες κλιματικές παραμέτρους προέκυψε ότι η χωρική μεταβολή των τιμών του στον ελλαδικό χώρο για μια συγκεκριμένη εποχή σχετίζεται κατά κύριο λόγο με το έλλειμμα πίεσης κορεσμού υδρατμών de . Δύο σχέσεις βρέθηκαν ως οι καταλληλότερες για να περιγράψουν τη σχέση των δύο παραμέτρων, η γραμμική $a_{pt} = ade + b$ και η μη γραμμική σχέση $a_{pt} = (a\sqrt{de} + b)^2$ (η δεύτερη μετασχηματίζεται σε γραμμική κατά την εφαρμογή της γραμμικής συσχέτισης χρησιμοποιώντας την $\sqrt{a_{pt}}$ ως εξαρτημένη και την \sqrt{de} ως ανεξάρτητη μεταβλητή) (Σχήμα 6). Τα αποτελέσματα της γραμμικής συσχέτισης και για την πρώτη περίπτωση και για τη δεύτερη

(με μετασχηματισμένες μεταβλητές), τόσο για τη θερινή όσο και για τη χειμερινή περίοδο, δίνονται στον Πίνακα 1, από τον οποίο προκύπτει ότι η χωρική μεταβλητότητα του συντελεστή περιγράφεται κατά ~94% από τη χωρική μεταβλητότητα της παραμέτρου de .

Η εποχιακή μεταβολή του συντελεστή a_{pt} εμφανίστηκε εντονότερη στις πεδινές περιοχές. Η διαφορά στις τιμές του συντελεστή a_{pt} μεταξύ θερινής και χειμερινής περιόδου μπορεί να περιγραφεί και μέσω της διαφοροποίησης του συντελεστή a (κλίση) των σχέσεων $a_{pt}-de$. Για τη γραμμική σχέση $a_{pt}-de$, η κλίση της καμπύλης κατά τη χειμερινή περίοδο βρέθηκε οκτώ φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τη θερινή περίοδο, ενώ για τη μη γραμμική σχέση (μετασχηματισμένη γραμμική) βρέθηκε τρεις φορές μεγαλύτερη (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Ανάλυση γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων a_{pt} και de για τη χειμερινή (Οκτώβριος-Μάρτιος) και θερινή (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) περίοδο, για δύο περιπτώσεις (με ή χωρίς μετασχηματισμένες μεταβλητές).

	Απρ-Σεπ		Οκτ-Μαρ	
	$a_{pt}=ade+b$	$\sqrt{a_{pt}} = a\sqrt{de} + b$	$a_{pt}=ade+b$	$\sqrt{a_{pt}} = a\sqrt{de} + b$
a	0.412*±0.0003†	0.353*±0.0002	3.024*±0.0006	1.168*±0.0004
b	0.861*±0.0003	0.777*±0.0002	0.706*±0.0019	0.637*±0.0007
R ²	0.929**	0.946**	0.931**	0.938**

† mean ± standard deviation, * p<0.00001 (t-test), ** p<0.00001 (ANOVA)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε ανάλυση του εποχιακού σφάλματος στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας αναφοράς ET_o με τη μέθοδο Priestley-Taylor και επαναπροσδιορισμός του συντελεστή μεταγωγής a_{pt} χρησιμοποιώντας ως βάση τη μέθοδο Penman-Monteith κατά ASCE. Η ανάλυση έγινε για όλο τον ελλαδικό χώρο με χρήση GIS και δεδομένα, τα οποία καλύπτουν μέσες μηνιαίες τιμές κλιματικών παραμέτρων για την περίοδο 1950-2000. Από την ανάλυση σφάλματος προέκυψε ότι, για το θερινό εξάμηνο Απριλίου-Σεπτεμβρίου, η P-T παρουσιάζει αποδεκτές τιμές σφάλματος στο 75.3%, ενώ για το χειμερινό εξάμηνο Οκτωβρίου-Μαρτίου στο 20.2% της ελληνικής επικράτειας. Ο επαναπροσδιορισμός της μέσης τιμής του συντελεστή a_{pt} για το χειμερινό και θερινό εξάμηνο έδειξε ότι η χωρική μεταβλητότά του παρουσιάζει συσχέτιση της τάξεως του ~94% με τη χωρική μεταβλητότητα του ελλείμματος πίεσης κορεσμού υδρατμών. Από την ανάλυση της εποχιακής μεταβολής του συντελεστή βρέθηκε ότι η μέση τιμή του για όλη την ελληνική επικράτεια κατά τη θερινή και χειμερινή περίοδο ήταν 1.29 και 1.51, αντίστοιχα. Η μεταβλητότητα της μέσης μηνιαίας τιμής του συντελεστή για όλη την ελληνική επικράτεια βρέθηκε εντονότερη κατά τη χειμερινή περίοδο (1.14-1.92), ενώ κατά τη θερινή περίοδο δεν ήταν τόσο ευμετάβλητη (1.17-1.43).

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alexandris, S., Kerkides, P. and Liakatas, A. 2006. *Daily reference evapotranspiration estimates by the "Copais" approach*. Agricultural Water Management, 82(3): 371-386.
- Alexandris, S. and Kerkides, P. 2003. *New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration*. Agricultural Water Management, 60(3): 157-180.
- Allen, R.G. and Pruitt, W.O. 1991. *FAO-24 reference evapotranspiration factors*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 117(5): 758-773.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300 p.
- Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D. and Jensen, M. 2005. *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation*. Environmental and Water Resources

- Institute of the American Society of Civil Engineers, 59 p.
- Ampas, V., Baltas, E. and Papamichail, D. 2007. *Comparison of Different Methods for the Estimation of the Reference Crop Evapotranspiration in the Florina Region*. WSEAS Transactions on Environment and Development, 12(2): 1449-1454.
- Anadranistakis, M., Liakatas, A., Kerkides, P., Rizos, S., Gavanosis, J. and Poulouvassilis, A. 2000. *Crop water requirements model tested for crops grown in Greece*. Agricultural Water Management, 45: 297-316.
- Aschonitis, V.G., Antonopoulos, V.Z. and Papamichail, D.M. 2012. *Evaluation of pan coefficient equations in a semi-arid Mediterranean environment using the ASCE standardized Penman-Monteith method*. Agricultural Sciences, 3(1): 58-65.
- Blaney, H.F. and Criddle, W.D. 1950. *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. USDA/SCS, SCS-TP 96., 44 p.
- Burman, R.D., Jensen, M.E., and Allen, R.G. 1987. *Thermodynamic factors in evapotranspiration*. In: L.G. James and M.J. English (Eds), Proc., Irrig. and Drain. Spec. Conf., ASCE, Portland, Oregon, July, 28-30.
- Γεωργίου, Π.Ε., Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Παπαζαφειρίου, Ζ. 2000. *Συγκριτική Αξιολόγηση των Μεθόδων Penman και Penman-Monteith με τη Βοήθεια Εκτιμήσεων Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς στην Ελλάδα*. Πρακτικά 5ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας - Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, 395-402.
- Castellvi, F., Stockle, C.O., Perez, P.J., and Ibanez, M. 2001. *Comparison of methods for applying the Priestley-Taylor equation at a regional scale*. Hydrological Processes, 15: 1609-1620.
- Dalezios, N.R., Loukas, A. and Bampzelis, D. 2002. *Spatial variability of reference evapotranspiration in Greece*. Physics and Chemistry of the Earth, 27 (23-24): 1031-1038.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper 24 (revised version), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 144 p.
- Eichinger, W.E., Parlange, M.B., and Strickler, H. 1996. *On the concept of equilibrium evaporation and the value of the Priestley-Taylor coefficient*. Water Resources Research, 32: 161-164.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. 1982. *Estimating potential evapotranspiration*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 108: 223-230.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. 1985. *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Applied Engineering in Agriculture ASABE, 1(2): 96-99.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. and Jarvis, A. 2005. *Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas*. International Journal of Climatology, 25: 1965-1978.
- Kotsopoulos, S. and Babajimopoulos, C. 1997. *Analytical estimation of modified Penman equation parameters*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 123(4): 253-256.
- Lhomme, J.-P. 1997. *A theoretical basis for the Priestley-Taylor coefficient*. Boundary-Layer Meteorology, 82: 179-191.
- Loukas, A., Vasiliades, L., Domenikiotis, C. and Dalezios, N.R. 2005. *Basin-wide actual evapotranspiration estimation using NOAA/AVHRR satellite data*. Physics and Chemistry of the Earth, 30(1-3): 69-79.
- McMahon, T.A., Peel, M.C., Lowe, L., Srikanthan, R. and McVicar, T.R. 2013. *Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis*. Hydrology and Earth System Sciences, 17: 1331-1363.
- Moges, S.A., Katambara, Z. and Bashar, K. 2003. *Decision support system for estimation of potential evapotranspiration in Pangani Basin*. Physics and Chemistry of the Earth, 28: 927-934.

- Παπαζαφειρίου, Γ.Ζ. 1999. *Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 368 σελ.
- Παπαμιχαήλ, Δ., Κωτσόπουλος, Σ. και Γεωργίου, Π. 1994. *Συγκριτική Ανάλυση των Έμμεσων Μεθόδων Εκτίμησης της Εξατμισοδιαπνοής της Καλλιέργειας Αναφοράς*. Πρακτικά 2ου Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας - Φυσικής της Ατμόσφαιρας, Θεσσαλονίκη, 35-43.
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ. και Γεωργίου, Π.Ε. 1999. *Συγκριτική Ανάλυση των Ωριαίων και Ημερήσιων Εκτιμήσεων της Εξατμισοδιαπνοής Αναφοράς με τη Μέθοδο FAO Penman - Monteith*. Πρακτικά 4ου Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ, Βόλος, τεύχος Α', 183-189.
- Paramichail, D.M. and Terzidis, G.A. 1996. *Assessment of the Meteorological Parameters Effects on the Daily Penman Reference Evapotranspiration*. 2nd International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, Chania, Acta Horticulturae, 49(1): 281-288.
- Peixoto, J.P. and Oort, A.H. 1996. *The climatology of relative humidity in the atmosphere*. Journal of Climate, 9: 3443-3463.
- Penman, H.L. 1948. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proceedings of the Royal Society London, A193: 120-145.
- Penman, H.L. 1956. *Estimating evaporation*. Transactions of American Geophysical Union, 37: 43-50.
- Pereira, A.R. 2004. *The Priestley–Taylor parameter and the decoupling factor for estimating reference evapotranspiration*. Agricultural and Forest Meteorology 125: 305-313.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. 1972. *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*. Monthly Weather Review, 100: 81-92.
- Sheffield, J., Goteti, G. and Wood, E.F. 2006. *Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling*. Journal of Climate, 19 (13): 3088-3111.
- Shuttleworth, W.J. and Wallace, J.S. 1985. *Evaporation from sparse crops – an energy combination theory*. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 111: 839-855.
- Singh, R.K. and Irmak, A. 2011. *Treatment of anchor pixels in the METRIC model for improved estimation of sensible and latent heat fluxes*. Hydrological Sciences Journal, 56: 895-906.
- Snyder, R.L. and Pruitt, W.O. 1985. *Estimating reference evapotranspiration with hourly data*. R. Snyder, D.W. Henderson, W.O. Pruitt, and A. Dong (Eds.), California Irrigation Management Systems, Final Report, VII-1-VII-3, University of California, Davis.
- Tabari, H. and Talaei, P.H. 2011. *Local calibration of the Hargreaves and Priestley–Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman–Monteith model*. Journal of Hydrologic Engineering, 16: 837-845.
- Tateishi, R. and Ahn, C.H. 1996. *Mapping evapotranspiration and water balance for global land surfaces*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 51: 209-215.
- Valiantzas, J.D. 2006. *Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data*. Journal of Hydrology, 331(3-4): 690-702.
- Weiß, M. and Menzel, L. 2008. *A global comparison of four potential evapotranspiration equations and their relevance to stream flow modelling in semi-arid environments*. Advances in Geosciences, 18: 15-23.
- Willett, K.M., Jones, P.D., Gillet, N.P. and Thorne, P.W. 2008. *Recent Changes in Surface Humidity: Development of the HadCRUH Dataset*. Journal of Climate, 21: 5364-5383.
- Wright, J.L. 1982. *New evapotranspiration crop coefficients*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 108: 57-74.
- Xu, J., Peng, S., Ding, J., Wei, Q. and Yu, Y. 2013. *Evaluation and calibration of simple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East China*. Archives of Agronomy and Soil Science, 59 (6): 845-858.