

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Αλεξανδρής Σ.^{1*}, Δ. Τσεσμελής¹, Ν. Προύτσος¹, Κ. Χατζηθωμάς¹, Ν. Σκόνδρας¹,
Δ. Σταματάκος¹, Κ. Βασιλάκου¹, Ι. Γκώτσης¹, Β. Φασούλη¹, Η. Βιτωράτος²,
Χ. Καραβίτης¹

¹Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Ιερά Οδός 75, Αθήνα 11855

²Syngenta Hellas A.E.B.E., Λ. Ανθούσας, Ανθούσα Αττικής 15349

*Στοιχεία επικοινωνίας: stalex@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται επίγεια και δορυφορικά μετεωρολογικά δεδομένα του έτους 2014 από την περιοχή της Βοιωτίας. Τα επίγεια δεδομένα προέρχονται από τον αυτόματο αγρομετεωρολογικό σταθμό (ΑΑΣ) μέτρησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΓΠΑ). Τα μετεωρολογικά δορυφορικά δεδομένα (SAT) αντιστοιχούν σε πολύγωνο 0.25°x0.25° εντός του οποίου λειτουργεί και ο ΑΑΣ. Χρησιμοποιώντας τα επίγεια αλλά και τα δορυφορικά δεδομένα, υπολογίστηκε η ET_o με τη μέθοδο FAO-56 PM, αλλά και με τρεις εμπειρικές μεθόδους (Copais, Valiantzas και Hargreaves-Samani) και πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις με σκοπό να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των μοντέλων. Ως βάση των συγκρίσεων υιοθετήθηκε η μέθοδος FAO-56 PM με χρήση επίγειων δεδομένων. Από την εργασία προκύπτει ότι τόσο για τα επίγεια όσο και για τα δορυφορικά δεδομένα η μέθοδος Copais δίνει τις καλύτερες εκτιμήσεις ακολουθούμενη από την μέθοδο Valiantzas και με σοβαρή υπερεκτίμηση η Hargreaves-Samani.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Εξατμοδιαπνοή αναφοράς, Δορυφορικά δεδομένα, Εμπειρικές μέθοδοι

CONTRIBUTION OF EMPIRICAL METHODS AND SATELLITE DATA USE FOR ESTIMATING DAILY REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

Alexandris S.^{1*}, D. Tsesmelis¹, N. Proutsos¹, C. Chatzithomas¹, N. Skondras¹,
D.Stamatakos¹, C. Vasilakou¹, I. Gkotsis¹, V. Fassouli¹, E.Vitoratos²,
C. Karavitis¹

¹Department of Natural Resources & Agr. Eng., 75 Iera Odos Av., 11855 Athens,

²Syngenta Hellas S.A., Anthoussa Av., 15349, Anthoussa, Attica, Greece

*Corresponding author: stalex@aua.gr

ABSTRACT

In the present study we used ground and satellite meteorological data of the year 2014 from the region of Viotia-Greece. The ground data were obtained from the automatic grass reference evapotranspiration station (AAS) of the Agricultural University of Athens. The satellite data (SAT) cover an area of 0,25° x 0,25° that includes the AAS. By using the ground and the satellite data we calculated the reference evapotranspiration, ET_o, with the method FAO-56 PM and with three empirical methods (Copais, Valiantzas and Hargreaves-Samani). The FAO-56 PM was used as a benchmark method to compare and validate the performances

of the others methods. The results show that for both the ground and the satellite data, Copais method is the most accurate followed by Valiantzas and Hargreaves-Samani, indicated by serious overestimation.

KEY WORDS: Reference Evapotranspiration, Satellite data, Empirical methods

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας της γεωργίας και κυρίως η άρδευση των καλλιεργειών, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πηγές κατανάλωσης νερού. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, στην άρδευση αντιστοιχεί περίπου το 24% του συνολικά καταναλισκόμενου όγκου νερού. Ωστόσο, η εντατική εφαρμογή αρδεύσεων στην νότια Ευρώπη (Ελλάδα, Ιταλία, Πορτογαλία, Κύπρος, Ισπανία) ανεβάζει το ποσοστό αυτό στο 80%, καθιστώντας επιτακτική, τόσο την ανάγκη περιορισμού της σπατάλης νερού όσο και την αύξηση της αποτελεσματικότητας των αρδεύσεων, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με την ακριβέστερη εκτίμηση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό (Kustas and Norman, 1996, Pereira et al., 1999).

Η εκτίμηση των ημερήσιων υδατοαπαιτήσεων των καλλιεργειών γίνεται είτε με άμεσες μετρήσεις, είτε έμμεσα μέσω εκτιμήσεων της εξατμοδιαπνοής¹ αναφοράς (ET_0) με την εφαρμογή μοντέλων. Στην πρώτη περίπτωση, ο άμεσος προσδιορισμός των αναγκών μιας καλλιέργειας σε νερό απαιτεί εγκατάσταση δαπανηρών και εξαιρετικά απαιτητικών σε επίπεδο τεχνογνωσίας, οργάνων, των λυσιμέτρων, ενώ τα σφάλματα που μπορούν να προκύψουν όταν η λειτουργία και συντήρησή τους δεν είναι η κατάλληλη, μπορεί να είναι πολύ σημαντικά (Jensen et al., 1990, Allen et al., 1998, Ventura et al., 1999, Rana and Katerji, 2000). Γι' αυτούς τους λόγους η χρήση τους γίνεται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς.

Η εκτίμηση της εξατμοδιαπνοής αναφοράς μπορεί να γίνει με την εφαρμογή μεθόδων που χρησιμοποιούν μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία είναι πιο εύκολα διαθέσιμα, καθιστώντας τη χρήση των μεθόδων αυτών, πιο διαδεδομένη. Οι πιο αξιόπιστες μέθοδοι εκτίμησης της εξατμοδιαπνοής αναφοράς είναι όσες διαθέτουν ισχυρό θεωρητικό φυσικό υπόβαθρο, έστω και αν περιέχουν κάποιον βαθμό εμπειρισμού, καθώς μπορούν να παρέχουν ικανοποιητικές εκτιμήσεις της ET_0 σε διαφορετικά κλιματικά καθεστάτα. Μια τέτοια μέθοδος είναι η FAO-56 PM (Allen et al. 1998), η οποία είναι ευρέως αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα όπως έχει επισημανθεί σε πολλές ερευνητικές εργασίες (Jensen et al., 1990, Ventura et al., 1999, Walter et al., 2005, Irmak and Irmak, 2008, Trajkovic and Kolakovic, 2009, Tabari et al., 2011).

Επειδή τα δεδομένα που απαιτούνται στις θεωρητικές (συνδυαστικές) μεθόδους δεν είναι πάντα διαθέσιμα, πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει την εκτίμηση της εξατμοδιαπνοής αναφοράς με την χρήση υπολογιστικά απλούστερων μεθόδων με μικρότερες απαιτήσεις σε δεδομένα. Οι μέθοδοι αυτές ονομάζονται εμπειρικές, λόγω του ότι έχουν προκύψει από απλές ή πολλαπλές συσχετίσεις κλιματικών παραμέτρων. Ως επί το πλείστον αποτελούν γραμμικά μοντέλα ακτινοβολίας, θερμοκρασίας ή ακόμη και σχετικής υγρασίας (Thornthwaite, 1948, Blaney and Criddle, 1950, Turc, 1961, Jensen and Haize, 1963, Priestley Taylor, 1972, Linacre, 1977, Hargreaves Samani, 1985, Alexandris et al., 2006, Valiantzas, 2013).

Στην Ελλάδα, η έλλειψη κατάλληλης ποιότητας επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων, δυσχεραίνει την εκτίμηση των ημερήσιων αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Η απαίτηση ύπαρξης καλλιέργειας αναφοράς, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ως υπόβαθρο των μετεωρολογικών σταθμών, αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την εκτίμηση της ET_0 με την εξίσωση FAO56-PM, καθιστώντας το πρόβλημα της έλλειψης ποιοτικών δεδομένων ακόμη

¹ Ο όρος: "εξατμοδιαπνοή" <https://www.itia.ntua.gr/dk-el/hydroglossica/orologia/>

πιο έντονο. Η γενικότερη έλλειψη μετεωρολογικών δεδομένων από επίγειους σταθμούς θα μπορούσε να καλυφθεί με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (Kustas and Norman, 1996, Esty et al., 2005, Ravenga, 2005, Allen et al., 2007a, Hsu et al., 2014, de Sherbinin et al., 2014), τα οποία καλύπτουν μεγαλύτερες επιφάνειες. Κάτι τέτοιο θα ήταν αδύνατο μόνο με τη χρήση επίγειων δεδομένων (Moran and Brondizio, 1994). Παρόλα αυτά, τα δορυφορικά δεδομένα αν και καλύπτουν μεγάλες επιφάνειες με τρόπο που οι επίγειοι σταθμοί δεν μπορούν, θα πρέπει να επαληθεύονται και από αξιόπιστα επίγεια δεδομένα (Running et al., 1989, Kustas and Norman, 1996, Allen et al., 2007b, Mu et al., 2007).

Η χρήση δορυφορικών δεδομένων με στόχο την εκτίμηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής (ET_a) ή της εξατμοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) έχει πραγματοποιηθεί από πολλούς ερευνητές (Bailey, 1990, Ramos et al., 2009, Blanta et al., 2011, Evans et al., 2011, Irmak et al., 2011). Ωστόσο, η σύγκριση τριών εμπειρικών μεθόδων με τη πρότυπη μέθοδο FAO-56 PM με παράλληλη χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων, που επιχειρείται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιείται για πρώτη φορά.

Η εργασία έχει σκοπό να αξιολογήσει μέσω συγκρίσεων, τις ημερήσιες τιμές της ET_o , που εκτιμήθηκαν από την εφαρμογή τριών εμπειρικών μεθόδων ET_o , με την χρήση τόσο επίγειων, όσο και δορυφορικών δεδομένων.

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τόσο επίγεια όσο και δορυφορικά μετεωρολογικά δεδομένα από την περιοχή της Βοιωτίας για μια πλήρη ετήσια περίοδο (από 1/1/2014 έως 31/12/2014). Τα επίγεια δεδομένα προέρχονται από τον Αυτόματο Αγρομετεωρολογικό σταθμό (ΑΑΣ) που βρίσκεται εγκατεστημένος σε επαρκώς αρδευόμενη έκταση γρασιδιού μισού στρέμματος εντός του πειραματικού αγρού του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών στη περιοχή της Αλιάρτου (23,092N, 38,392E) Βοιωτίας (Εικόνα 1). Αυτά τα δεδομένα έχουν αξιολογηθεί ποιοτικά και έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία εμπειρικών μοντέλων ET_o ακόμη και σε ωριαία βάση (Alexandris and Kerkides, 2003, Chatzithomas and Alexandris, 2015).



Εικόνα 1. Η περιοχή εφαρμογής (πολύγωνο δορυφόρου) και η θέση του ΑΑΣ (Grass reference Evapotranspiration station) στο κτήμα Αλιάρτου.

Ο ΑΑΣ διαθέτει αυτόματο σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων (data logger) τύπου CR10X (Campbell Sci.) και αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας (T), σχετικής υγρασίας (RH), ανεμοταχύτητας σε ύψος 2μ (u_2), ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (R_s) και καθαρής ακτινοβολίας (R_n). Από τους αισθητήρες λαμβάνονται 3 αναγνώσεις (samples) το λεπτό (180 αναγνώσεις ανά ώρα). Τα ημερήσια δεδομένα προκύπτουν από την μέση τιμή

24ωρου (T , RH , R_s , R_n) ενώ η T_{max} και η T_{min} αποδίδει την απόλυτη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αντίστοιχα από τις 4320 αναγνώσεις του 24ωρου. Οι τύποι των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν για τις εκτιμήσεις της ET_o είναι: θερμο-υγρόμετρο MP100A (Rotronic Analog Meteorological Probe), ανεμόμετρο κυπέλου A100L2 (Vector Instruments, Πυρανόμετρο/Αλμπεντόμετρο LP-PYRA 06 (Delta OHM) και ακτινόμετρο καθαρής ακτινοβολίας NR Lite2 (Kipp & Zonen).

Τα δορυφορικά δεδομένα έχουν διατεθεί από την εταιρεία Syngenta Hellas A.E.B.E. και αντιπροσωπεύουν έκταση $770,06 \text{ km}^2$ (Εικόνα 1). Καλύπτουν πολύγωνο διαστάσεων $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ και αφορούν σε ημερήσιες εκτιμήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων T , RH , R_s και u_2 . Οι ημερήσιες τιμές της R_n υπολογίστηκαν από τις τιμές της R_s σύμφωνα με την διαδικασία που προτείνεται στο FAO-56 paper (Duffie and Beckman, 1991, Allen et al. 1998).

2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ

Οι εμπειρικές μέθοδοι που αξιολογήθηκαν είναι η Hargreaves-Samani (1985), με βάση την θερμοκρασία (temperature based) και οι Copais (Alexandris et al. 2006) και Valiantzas (Valiantzas, 2013), με βάση την ακτινοβολία (radiation based), οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω. Για την αξιολόγησή τους υιοθετήθηκε ως βάση αναφοράς (benchmark method) η μέθοδος FAO-56 PM, με χρήση επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων του ΑΑΣ, που λαμβάνονται πάνω από καλλιέργεια αναφοράς γρασιδιού. Η πρότυπη συνδυαστική μέθοδος FAO-56 PM έχει προταθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Τροφίμων (FAO-56 Irrigation and Drainage Paper) και περιγράφεται από μεγάλο αριθμό ερευνητών (Pereira et al., 1999, Allen et al., 1998, Walter et al., 2005, Alexandris et al., 2008).

2.2.1. FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998)

Η μέθοδος FAO-56 PM έχει προταθεί και αποδίδει αξιόπιστες εκτιμήσεις μόνο σε συγκεκριμένες συνθήκες που καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας αναφοράς και την διαθεσιμότητα επαρκούς εδαφικής υγρασίας. Η χρήση της μεθόδου κάτω από άτυπες συνθήκες (non standardized) οδηγεί σε υπερβολικές υπερεκτιμήσεις και συνεπώς σε μη ορθολογική προσέγγιση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Η εξίσωση FAO-56 PM για τον υπολογισμό της ET_o σε ημερήσια βάση έχει τη μορφή της εξίσωσης 2.1.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (2.1)$$

όπου, ο όρος ET_o αναφέρεται στην εξατμοδιαπνοή (mm day^{-1}), R_n είναι η καθαρή ροή πυκνότητας ακτινοβολίας στην επιφάνεια της καλλιέργειας ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), G είναι η πυκνότητα της ροής θερμότητας του εδάφους ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 2 μέτρων ($^\circ\text{C}$), u_2 είναι η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο των 2 μέτρων (m s^{-1}), e_s είναι η τάση κορεσμένων υδρατμών (kPa), e_a είναι η πραγματική τάση υδρατμών (kPa), Δ είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδρατμών με τη θερμοκρασία αέρα ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) και γ είναι ο ψυχομετρικός συντελεστής ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$). Η ημερήσια πυκνότητα ροής θερμότητας του εδάφους λαμβάνεται $G=0$.

2.2.2. Hargreaves Samani (Hargreaves-Samani, 1985)

Η εξίσωση Hargreaves (1975) η οποία τροποποιήθηκε το 1985 για συνθήκες γρασιδιού και απαιτεί μετρήσεις θερμοκρασίας και ακολουθεί την εξίσωση 2.2.

$$ET_o = 0,0023(T_{max} - T_{min})^{0.5} (T + 17,8) R_a \quad (2.2)$$

όπου T , T_{max} και T_{min} είναι η μέση, η μέγιστη και η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$) αντίστοιχα και η R_a είναι η ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας (mm day^{-1}) εκτιμώμενη από το γεωγραφικό πλάτος και την ημέρα του έτους (DOY).

2.2.3 Copais (Alexandris et al., 2006)

Η τελική μορφή της συγκεκριμένης μεθόδου για τον υπολογισμό της ημερήσιας ET_o εκφράζεται από την εξίσωση 2.3 καθώς και από τις εξισώσεις 2.4 και 2.5.

$$ET_o = m_1 + m_2 C_2 + m_3 C_1 + m_4 C_1 C_2 \quad (2.3)$$

όπου $m_1 = 0,057$, $m_2 = 0,277$, $m_3 = 0,643$, $m_4 = 0,0124$ και

$$C_1 = 0,6416 - 0,00784RH + 0,372R_s - 0,00264 R_s RH \quad (2.4)$$

$$C_2 = -0,0033 + 0,00812T + 0,101R_s + 0,00584 R_s T \quad (2.5)$$

όπου RH είναι η μέση σχετική υγρασία (%), R_s είναι η μέση ηλιακή εισερχόμενη ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) και T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$).

2.2.4. Valiantzas (Valiantzas, 2013)

Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου εκφράζεται από την εξίσωση 2.6 η οποία δεν απαιτεί δεδομένα για την ταχύτητα ανέμου.

$$ET_o \approx 0,0393R_s \sqrt{T + 9,5} - 0,19R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0,078(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (2.6)$$

όπου, R_s είναι η ηλιακή ακτινοβολία ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), T είναι η θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}\text{C}$), RH είναι η σχετική υγρασία (%) και φ το γεωγραφικό πλάτος σε rad.

2.3. ΔΕΙΚΤΕΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Για την αξιολόγηση της επίδοσης των μεθόδων εφαρμόστηκαν ποσοτικές προσεγγίσεις. Η στατιστική ανάλυση που επιχειρήθηκε έγινε σύμφωνα με τους στατιστικούς δείκτες που προτείνονται στην διεθνή βιβλιογραφία όπως περιγράφονται και αιτιολογούνται σε σχετικές εργασίες (Willmott and Wicks, 1980, Fox, 1981, Willmott, 1981, 1982, Alexandris et al., 2008). Εκτός των συντελεστών R και R^2 , της τυπικής γραμμικής παλινδρόμησης ($y=ax+b$), που χρησιμοποιούνται συνήθως ως μέτρο συσχέτισης, υπολογίστηκαν και άλλοι δείκτες για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, καθώς, όπως έχει επισημανθεί από τους Fox (1981) και Willmott (1982), η χρήση των R και R^2 πολλές φορές δεν ενδείκνυται και είναι παραπλανητική, ειδικά στις περιπτώσεις σύγκρισης εκτιμώμενων και παρατηρούμενων μεταβλητών. Ο "Δείκτης συμφωνίας" (d), που προτείνεται εναλλακτικά (Willmott και Wicks, 1980, Willmott, 1981, 1982), αποτελεί ένα περιγραφικό μέτρο που μπορεί να εφαρμοστεί σε διασταυρούμενες συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων, ως σχετικό μέτρο αλλά και ως μέτρο οριοθέτησης. Επίσης ο Fox (1981) συνιστά, τέσσερις τύπους μέτρων αξιολόγησης που πρέπει να υπολογίζονται και να αναφέρονται. Ως μέτρο μεροληψίας μπορεί να υιοθετηθεί ο δείκτης

MBE. Η διακύμανση της κατανομής των διαφορών (s_d^2) εκφράζει απλώς τη μεταβλητότητα της διαφοράς μεταξύ της εκτίμησης (P) και παρατήρησης (O) γύρω από την τιμή του MBE. Εναλλακτικά, η μέση διαφορά μπορεί να εκφραστεί από την ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) ή το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE). Οι δείκτες RMSE και MAE είναι από τα καλύτερα συνολικά μέτρα της επίδοσης ενός μοντέλου, επειδή συνοψίζουν τη μέση διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων (O) και εκτιμώμενων τιμών (P). Παρά το γεγονός ότι MAE και RMSE είναι παρόμοια μέτρα, σε πολλές περιπτώσεις είναι σκόπιμο να αναφέρονται και οι δύο δείκτες.

Έτσι, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας υπολογίστηκαν, ο Δείκτης Συμφωνίας (Index of Agreement, d), η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (root mean square error-RMSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE), το μέσο σφάλμα μεροληψίας (Mean Bias Error, MBE), και ο συντελεστής R^2 της παλινδρόμησης $y = a x + b$.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα περιγραφικά στατιστικά των κλιματικών δεδομένων που μετρήθηκαν από τον επίγειο σταθμό (ΑΑΣ) και από τον δορυφόρο (SAT) για αριθμό ημερών $N=365$ (έτος 2014) παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, συγκριτικά. Επίσης παρουσιάζονται οι συντελεστές των γραμμικών συσχετίσεων (a, b και R^2 της παλινδρόμησης $y=ax+b$) των επίγειων δεδομένων με τα δορυφορικά.

Πίνακας 1. Περιγραφικά στατιστικά επίγειων και δορυφορικών (SAT) δεδομένων.

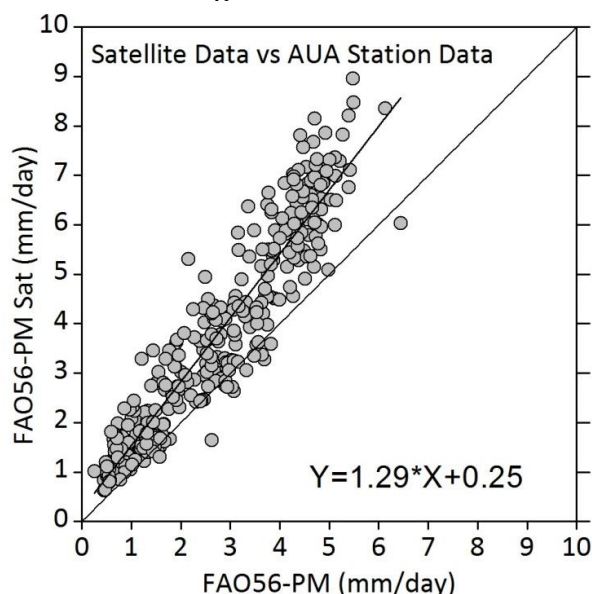
	Min		Max		M.O.		Std. Dev		Range		Συντελεστές παλινδρόμησης $y=ax+b$		
	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	a	b	R^2
T	0,5	2,1	31,4	30,1	17,0	17,3	6,5	6,7	30,9	28,0	1,02	0,10	0,97
T_{max}	1,0	3,4	40,4	40,1	23,9	23,4	7,7	7,8	39,4	36,7	0,98	-0,04	0,96
T_{min}	-1,1	-0,5	21,3	23,6	10,1	11,9	5,6	5,8	22,4	24,1	0,99	1,86	0,90
RH	31,7	35,0	100,0	91,0	76,0	67,5	13,8	13,9	68,3	56,0	0,86	1,81	0,74
RH_{max}	61,8	51,0	100,0	98,0	98,5	83,9	5,1	10,4	38,2	47,0	0,60	24,9	0,09
RH_{min}	10,4	12,0	100,0	86,0	46,4	47,0	19,0	16,6	89,5	74,0	0,75	12,0	0,76
u_2	0,0	1,3	3,3	8,1	0,8	2,7	0,5	1,0	3,3	6,8	1,13	1,77	0,42
R_s	12,0	42,0	358,2	343,4	191,8	203,6	103,2	87,9	346,2	301,4	0,82	47,0	0,92

Γενικά, τα δορυφορικά δεδομένα προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες τιμές των επίγειων, όπως προκύπτει και από τις κλίσεις a των γραμμικών συσχετίσεων του Πίνακα 1. Οι θερμοκρασίες (T , T_{max} και T_{min}) εμφανίζουν πολύ μικρές μέσες αποκλίσεις (+2%, -2% και -1%, αντίστοιχα), όμως οι σχετικές υγρασίες (RH, RH_{max} και RH_{min}) παρουσιάζονται μειωμένες (-14%, -40% και -25%, αντίστοιχα). Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη υγρών μικρομετεωρολογικών συνθηκών στο σταθμό (ΑΑΣ) λόγω της έντονης διαπνοής της φυτοκαλυμμένης επιφάνειας (ενεργό γρασίδι ύψους 8-12 cm), η οποία «ενθαρρύνεται» από την πλήρη επάρκεια εδαφικού νερού όλο τον χρόνο, και ιδιαίτερα στους θερμούς μήνες. Η ηλιακή ακτινοβολία R_s (δεδομένα SAT) εμφανίζεται επίσης μειωμένη (-18%), όμως σημαντικά αυξημένη είναι η ανεμοταχύτητα (+13%). Οι αποκλίσεις αυτές είναι αναμενόμενες καθώς οι δορυφορικές μετρήσεις προσεγγίζουν σφαιρικά, σε μια αρκετά εκτεταμένη περιοχή, τις μέσες ατμοσφαιρικές συνθήκες και συνεπώς δεν θα μπορούσαν να αποτυπώσουν και να προσεγγίσουν με ακρίβεια την ψυχομετρία και το ισοζύγιο ενέργειας πάνω από μια επιφάνεια όπως αυτή του ΑΑΣ.

Ως προς τη διασπορά τους, οι μέσες ημερήσιες τιμές των περισσότερων μετεωρολογικών παραμέτρων παρουσιάζουν ικανοποιητικές συσχετίσεις μεταξύ δορυφορικών επίγειων δεδομένων. Σχεδόν άριστες είναι οι συσχετίσεις της θερμοκρασίας: T ($R^2=0,97$), T_{\max} ($R^2=0,96$) και T_{\min} ($R^2=0,90$), αλλά και της ακτινοβολίας R_s ($R^2=0,92$). Η σχετική υγρασία παρουσιάζει αρκετά καλή συσχέτιση των μέσων (RH) και ελάχιστων (RH_{\min}) ημερήσιων τιμών της ($R^2=0,74$ και $0,76$, αντίστοιχα), όμως οι μέγιστες (RH_{\max}) εμφανίζουν πολύ μικρή συσχέτιση ($R^2=0,09$) και μεγάλη διασπορά. Τέλος, η ταχύτητα του ανέμου (u_2) παρουσιάζει μέτρια συσχέτιση ($R^2=0,42$).

3.2. Σύγκριση FAO-56 PM vs FAO-56 PM_{SAT}

Η Εικόνα 2 εμφανίζει την γραμμική σχέση και τη διασπορά των εκτιμήσεων της ET_o με τη μέθοδο FAO-56 PM, όπως προκύπτουν από τη χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων (FAO-56 PM vs FAO-56 PM_{SAT}). Είναι εμφανές ότι η FAO-56 PM_{SAT} υπερεκτιμά στο σύνολο του έτους σε σχέση με την FAO-56 PM κατά 38,9 %, δίνοντας αθροιστική ετήσια υπερεκτίμηση της ET_o κατά 358,64 mm, καθώς οι επιμέρους ετήσιες εκτιμήσεις της ET_o , όπως προκύπτουν από το άθροισμα των ημερήσιων τιμών του έτους για την κάθε περίπτωση, είναι 1280,7 mm και 922,0 mm αντίστοιχα.



Εικόνα 2. Γραμμική παλινδρόμηση των εκτιμήσεων ET_o της μεθόδου FAO-56 PM, με χρήση επίγειων δεδομένων (X-άξονας) και δορυφορικών δεδομένων (Y-άξονας).

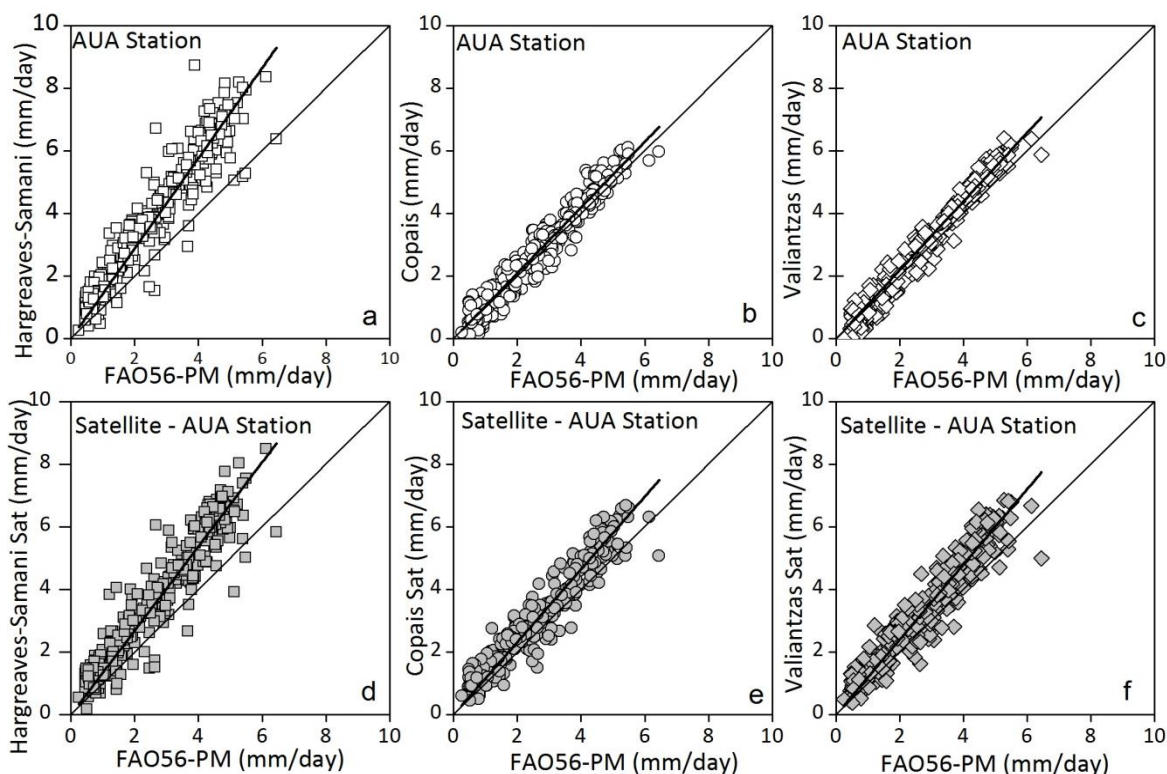
3.3. Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων ET_o - ΑΑΣ & SAT

Από την συγκριτική αξιολόγηση των εμπειρικών μεθόδων (Hargreaves-Samani, Copais και Valiantzas), σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο αναφοράς FAO-56 PM (δεδομένα ΑΑΣ), προέκυψαν οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης που παραθέτονται στον Πίνακα 2.

Από τη σύγκριση των εκτιμήσεων της ET_o των τριών εμπειρικών μεθόδων σε ημερήσιο βήμα υπολογισμού (Hargreaves-Samani, Copais, Valiantzas), έναντι της επιλεγόμενης μεθόδου αναφοράς FAO56-PM προέκυψαν οι αποκλίσεις των γραμμικών τάσεων όπως εμφανίζονται στην Εικόνα 3. Η χρήση επίγειων δεδομένων των μέσων ημερήσιων τιμών (T , RH , R_s) από τον σταθμό (ΑΑΣ) έδωσε μια ελάχιστη υπερεκτίμηση των εμπειρικών μεθόδων Copais (+3,6%) και Valiantzas (7,0%) σε ετήσια βάση, ενώ η υπερεκτίμηση της μεθόδου Hargreaves-Samani (απουσία σχετικής υγρασίας RH) ανήλθε στο +48,7% χαρακτηριζόμενη ως ακραία υψηλή.

Πίνακας 2. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης των συγκρινόμενων εμπειρικών μεθόδων σε σχέση με την μέθοδο FAO-56PM (ΑΑΣ).

	a	b	MBE	RMSE	MAE	s_d^2	D	R ²
FAO56-PM	-	-	-	-	-	-	-	-
Hargreaves-Samani	1,322	0,417	1,231	1,477	1,258	0,667	0,857	0,911
Copais	1,082	0,279	0,485	0,682	0,562	0,229	0,958	0,930
Valiantzas	1,136	0,226	0,569	0,781	0,636	0,286	0,948	0,929
FAO56-PM _{SAT}	1,291	0,246	0,983	1,278	1,008	0,669	0,886	0,898
Hargreaves-Samani _{SAT}	1,236	0,379	0,974	1,210	1,026	0,515	0,893	0,907
Copais _{SAT}	1,084	-0,121	0,091	0,413	0,343	0,162	0,984	0,952
Valiantzas _{SAT}	1,167	-0,245	0,178	0,443	0,382	0,165	0,983	0,972



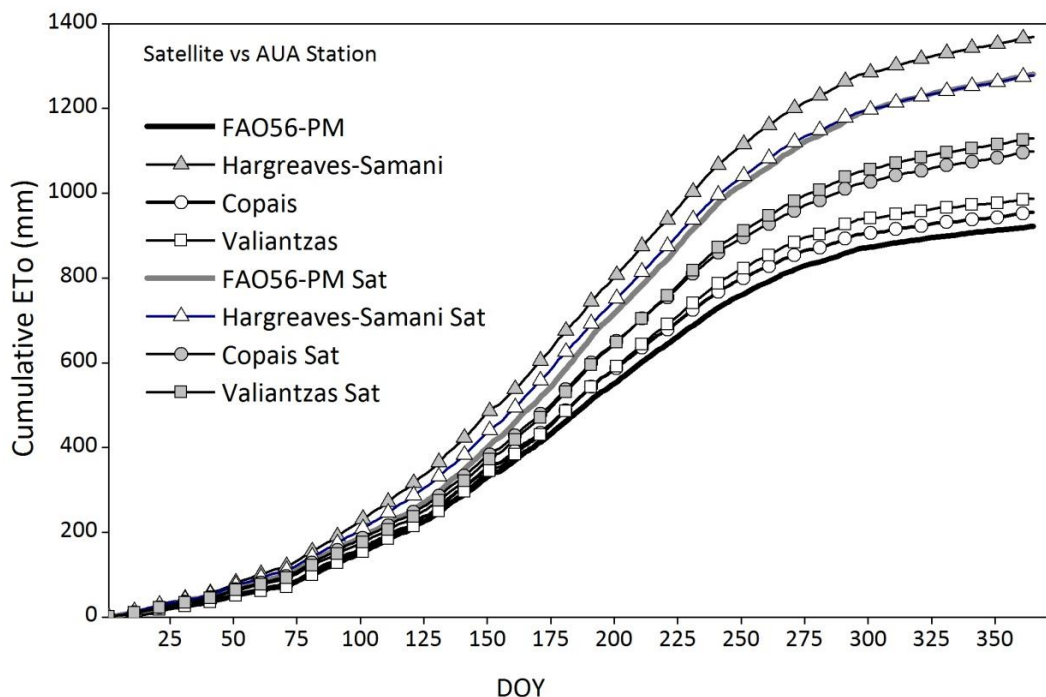
Εικόνα 3. Σύγκριση των εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ET_0 ($mm\ day^{-1}$) από επίγεια (σειρά A) και δορυφορικά δεδομένα (σειρά B) σε σχέση με την FAO-56 PM (ΑΑΣ).

Αντίστοιχοι υπολογισμοί με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων για το ίδιο ακριβώς διάστημα δίνουν αρκετά διαφοροποιημένες εκτιμήσεις συγκρινόμενες με τις αντίστοιχες τιμές με τη χρήση επίγειων δεδομένων: κατά +17% για την Copais, +22% για την Valiantzas και ακολουθεί η Hargreaves-Samani με +38% παρουσιάζοντας όμως μείωση της υπερεκτίμησης κατά 10% συγκριτικά με την χρήση επίγειων μετρήσεων. Η ετήσια ET_0 , η οποία εκτιμήθηκε από την μέθοδο αναφοράς FAO-56 PM ($922,04\ mm\ year^{-1}$, δεδομένα ΑΑΣ,) καθώς και οι αντίστοιχες τιμές των συγκρινόμενων μεθόδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3, ενώ στην Εικόνα 4 εμφανίζονται οι αθροιστικές ημερήσιες τιμές ET_0 (365 εκτιμήσεις για κάθε μέθοδο) για το έτος 2014 που προέρχονται από επίγεια (ΑΑΣ) και δορυφορικά (SAT).

Τέλος στον Πίνακα 4, παρουσιάζονται οι μηνιαίες τιμές σε mm της εξατμοδιαπνοής αναφοράς που προέκυψαν από το άθροισμα των ημερήσιων εκτιμήσεων και από τις δύο ομάδες δεδομένων (ΑΑΣ, SAT). Οι μήνες που επιλέχτηκαν αντιστοιχούν σε μια τυπική αρδευτική περίοδο της μεσογειακής ζώνης. Τα εμφανιζόμενα ποσοστά (%) εκφράζουν τις υπερεκτιμήσεις (+) ή υποεκτιμήσεις (-) των μεθόδων συγκριτικά με την μέθοδο FAO-56 PM (δεδομένα ΑΑΣ).

Πίνακας 3. Ετήσια εκτίμηση ET_o ($mm\ year^{-1}$) και ποσοστά υπερεκτιμήσεων των μεθόδων σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς (Benchmark method).

Προέλευση δεδομένων	ET_o ($mm\ year^{-1}$) & (%)			
	FAO-56 PM	Hargreaves Samani	Copais	Valiantzas
ΑΑΣ (επίγεια)	922 (Benchmark)	1371 (+49%)	955 (+3.6%)	987 (+7.0%)
SAT(δορυφόρου)	1281 (+39%)	1277 (+38%)	1099 (+17%)	1130 (+22%)



Εικόνα 4. Οι διαφορές που προκύπτουν στο άθροισμα της ET_o από όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ως προς την FAO-56 PM (επίγεια δεδομένα)

Πίνακας 4. Μηνιαίες τιμές ET_o που προκύπτουν από το άθροισμα ημερήσιου βήματος εκτίμησης για τους μήνες Μάιο έως Οκτώβριο του έτους 2014, από επίγεια (ΑΑΣ) και δορυφορικά δεδομένα (SAT).

ΜΗΝΑΣ	FAO56-PM		Hargreaves - Samani		Copais		Valiantzas	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Εκτιμήσεις από δεδομένα ΑΑΣ								
ΜΑΙΟΣ	121,3		169,4	+28,4	132,0	+8,1	131,8	+8,0
ΙΟΥΝΙΟΣ	128,7		189,6	+32,1	133,7	+3,7	141,3	+8,9
ΙΟΥΛΙΟΣ	144,6		207,0	+30,1	153,0	+5,5	162,9	+11,3
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	130,4		197,0	+33,8	134,3	+2,9	147,0	+11,3
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	87,8		130,2	+32,5	84,9	-3,4	94,5	+7,0
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	63,0		88,5	+28,9	69,9	+9,9	65,22	+3,4
Εκτιμήσεις από δεδομένα SAT								
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
ΜΑΙΟΣ	148,8	+18,5	152,5	+20,4	135,8	+10,7	134,45	+9,8
ΙΟΥΝΙΟΣ	180,1	+28,5	185,1	+30,5	153,9	+16,4	158,89	+19,0
ΙΟΥΛΙΟΣ	203,3	+28,9	195,5	+26,0	171,7	+15,8	179,13	+19,3
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	199,8	+34,7	184,3	+29,2	159,4	+18,2	171,27	+23,9
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	123,9	+29,1	121,6	+27,8	96,2	+8,7	106,46	+17,5
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	78,4	+19,7	80,5	+21,8	77,4	+18,6	72,11	+12,7

4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αξιολογήσει τη δυνατότητα χρήσης δορυφορικών δεδομένων για την εκτίμηση της ET_0 , αλλά και να διερευνήσει την ακρίβεια των εκτιμήσεων που προέρχονται από διαφορετικά εμπειρικά μοντέλα, ώστε να διαπιστωθεί τυχόν συνεισφορά των παρατηρήσεων αυτών στην ακριβή προσέγγιση των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Η ακριβής εκτίμηση της ET_0 με δορυφορικά δεδομένα θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη σε αγροτικές περιοχές, καθώς η ύπαρξη κατάλληλων σταθμών με υπόβαθρο πρότυπης επιφάνειας αναφοράς (γρασίδι ή μηδική) και με επάρκεια εδαφικής υγρασίας είναι σχεδόν ανύπαρκτη, με αποτέλεσμα τα λαμβανόμενα δεδομένα να μη ικανοποιούν τις ποιοτικές απαιτήσεις των μοντέλων εκτίμησης της ET_0 και ως εκ τούτου να οδηγούν σε μη αξιόπιστες εκτιμήσεις της ET_0 και κατ' επέκταση σε σημαντικά και συστηματικά σφάλματα στον προγραμματισμό άρδευσης (Αλεξανδρή κ.ά., 2013).

Από την παρούσα εργασία προέκυψε ότι ανεξάρτητα από το είδος των δεδομένων (ΑΑΣ ή SAT), καλύτερες προσεγγίσεις της ET_0 δίνει η μέθοδος Copais και ακολουθούν οι Valiantzas και Hargreaves-Samani. Οι εκτιμήσεις της ET_0 με τη μέθοδο FAO-56 PM, με χρήση ημερήσιων δορυφορικών δεδομένων είναι σχεδόν κατά 30% μεγαλύτερες των αντίστοιχων εκτιμήσεων που έδωσε η ίδια μέθοδος με τη χρήση επίγειων δεδομένων (Εικόνα 2). Η ετήσια υπερεκτίμηση φτάνει το +39%, ενώ σε εποχιακή βάση, οι μεγαλύτερες υπερεκτιμήσεις, εντοπίζονται κατά την θερινή περίοδο (σε εύρος ET_0 από 3 έως 7 mm day⁻¹ στον ΑΑΣ), όπου η ημερήσια υπερεκτίμηση κυμαίνεται μεταξύ 2,0 και 3,5 mm day⁻¹.

Οι μεγαλύτερες μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες (T), οι μικρότερες σχετικές υγρασίες (RH , RH_{max} και RH_{min}) αλλά κυρίως οι μεγαλύτερες μέσες ανεμοταχύτες (u_2) των δορυφορικών δεδομένων σε σχέση με τα επίγεια, επηρεάζουν τόσο τον αεροδυναμικό όσο και τον ενεργειακό όρο της μεθόδου FAO-56 PM, δίνοντας σημαντικές υπερεκτιμήσεις. Μάλιστα, η επίδραση αυτών των διαφορών στον αεροδυναμικό όρο της μεθόδου, είναι σημαντικά σπουδαιότερη από ότι η επίδραση στον ενεργειακό. Βέβαια, από την άλλη πλευρά, οι μικρότερες τιμές T_{max} , T_{min} αλλά και R_s (των δορυφορικών σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα), βελτιώνουν σχετικά την ακρίβεια των υπολογισμών, όμως όχι σε τέτοιο βαθμό που τελικά να αμβλύνουν σημαντικά τις αποκλίσεις στις εκτιμήσεις της ET_0 .

Από τη σύγκριση των μεθόδων προκύπτει ότι οι δύο εμπειρικές μέθοδοι (Copais και Valiantzas) έδωσαν πολύ μικρότερες υπερεκτιμήσεις σε ετήσια βάση, $Copais_{SAT}$ (+177mm) και $Valiantzas_{SAT}$ (+208mm), συγκρινόμενες με την μέθοδο FAO-56 PM_{SAT} (+359mm). Αυτές οι μέθοδοι αποτελούν κατά κάποιο τρόπο «υβριδικές» μορφές της πρότυπης μεθόδου FAO-56 PM. Η Copais προέρχεται από παραμετροποίηση μεγάλου αριθμού ωριαίων και ημερήσιων γεγονότων ET_0 (FAO-56 PM) και αντίστοιχων μετεωρολογικών παραμέτρων (trend surface analysis, Alexandris and Kerkides, 2003 Alexandris et al., 2006) και η μέθοδος Valiantzas προκύπτει από την απλοποίηση του μοντέλου Penman μέσω βαθμονομημένων συντελεστών. Και οι δύο μέθοδοι απαιτούν δεδομένα R_s , T , και RH , χωρίς όμως απαιτήσεις σε δεδομένα ανεμοταχύτητας. Έτσι, η χρήση δορυφορικών δεδομένων σε αυτές τις μεθόδους, θα οδηγήσει αφενός σε υπερεκτιμήσεις εξαιτίας των ελαφρώς αυξημένων τιμών T και των μειωμένων τιμών RH και αφετέρου σε υποεκτιμήσεις λόγω των μικρότερων τιμών R_s . Έτσι, τελικά οι διαφορές στις τιμές της ET_0 αμβλύνονται σημαντικά, δίνοντας αξιόπιστες προσεγγίσεις.

Η μέθοδος Hargreaves-Samani είναι δημοφιλής και ευρέως διαδεδομένη λόγω των ελαχίστων απαιτήσεων σε δεδομένα. Ωστόσο πολλοί ερευνητές έχουν δείξει ότι η μέθοδος υπερεκτιμά σε υγρά καθεστώτα και υποεκτιμά στα ξηρότερα με υψηλές ταχύτητες ανέμου (Jensen et al., 1997, Allen et al., 1998, Droogers and Allen, 2002, Temesgen et al., 2005, Garcia et al., 2004). Στην παρούσα αξιολόγηση φαίνεται η έντονη υπερεκτίμηση της μεθόδου πάνω από την καλλιέργεια αναφοράς (+49%), ενώ αξίζει να επισημανθεί ότι η χρήση των

δορυφορικών δεδομένων θερμοκρασίας στη μέθοδο, έδωσε βελτιωμένες προσεγγίσεις κατά 10%, ή ακόμη και κατά 1% μικρότερες υπερεκτιμήσεις, σε σχέση με την μέθοδο FAO-56 PM_{SAT} .

Εν κατακλείδι τα αποτελέσματα αυτής της διερευνητικής προσέγγισης, στην περιοχή εφαρμογής (Αλίαρτο Βοιωτίας) σε ένα πολύγωνο αγροτικής περιοχής, έδειξαν ότι οι εμπειρικές μέθοδοι που εξετάστηκαν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά και να αποτελέσουν χρήσιμα εργαλεία χωρικών εκτιμήσεων της ET_0 για έρευνα και επιχειρησιακούς σκοπούς, ειδικά σε περιοχές με έλλειψη δεδομένων. Τα εμπειρικά μοντέλα με απευθείας χρήση δορυφορικών δεδομένων, δίνουν αξιόπιστες εκτιμήσεις της ET_0 , με σχετικά μικρές υπερεκτιμήσεις. Η χρήση δεδομένων ανεμοταχύτητας από δορυφόρους θα πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς υπερεκτιμούνται και έχουν σημαντική επίδραση στην αύξηση των αποκλίσεων κατά τον υπολογισμό της ET_0 . Προτείνεται περαιτέρω εκτενέστερη έρευνα προκειμένου να προκύψουν πιο ακριβείς προσεγγίσεις της ET_0 , καθώς η τεχνολογία και η εξέλιξη των αισθητήρων των δορυφόρων επιταχύνεται και συνεπώς θα μπορούσε να αναβαθμισθεί ο ρόλος των εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ET_0 .

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά την εταιρεία Syngenta Hellas A.E.B.E. για τη συνεργασία και την παραχώρηση των δορυφορικών δεδομένων για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται και προς τους ανώνυμους κριτές που βοήθησαν σημαντικά στην αρτιότερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αλεξανδρή Σ., Ν. Προύτσος, Χ. Καραβίτης, Ι. Τσίρος, Δ. Σταματάκος 2013. Λόγοι Εσφαλμένης Εκτίμησης Εξατμοδιαπνοής Αναφοράς στον Ελλαδικό χώρο. 8^ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής. Βόλος, 2013
- Alexandris, S. and Kerkides, P. 2003. *New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration*. Agric. Water Management, 60: 181–198.
- 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., Stricevic, R. and Petkovic, S. 2008. *Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula*. European Water 21/22: 17-28.
- Allen, R.G, Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements-* FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome.
- Allen, R., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J., Bastiaanssen, W., Kramber, W., Lorite, I. and Robison, C. 2007a. *Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Applications*. J. Irrig. Drain Eng., 133(4): 395–406. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395))
- Allen, R., Tasumi, M. and Trezza, R. 2007b. *Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model*. J. Irrig. Drain Eng., 133(4): 380–394.
- Bailey, J.O. 1990. *The Potential Value of Remotely Sensed Data in the Assessment of Evapotranspiration and Evaporation*. Remote Sensing Reviews, 4(2): 349-377.
- Blaney, H. F. and Criddle, W. D. 1950. *Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data*. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service., Tech. Pap. No. 96, 48 pp.

- Blanta, A., Dalezios, N.R., Maliara, A. and Spyropoulos, N. 2011. *Monitoring cotton crop evapotranspiration based on satellite data*. In: M. Salampasis, A. Matopoulos (eds.): Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technologies for Sustainable Agri-production and Environment (HAICTA 2011), Skiathos, 8-11 September, 2011.
- Chatzithomas, C. D. and Alexandris, S. 2015. *Solar radiation and relative humidity based, empirical method, to estimate hourly reference evapotranspiration*. Agricultural Water Management, 152: 188–197. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.019>
- de Sherbinin, A., Levy, M.A., Zell, E., Weber, S. and Jaiteh, M. 2014. *Using satellite data to develop environmental indicators*. Environ. Res. Lett. 9(2014): 1-12.
- Droogers, P. and Allen, R.G., 2002. Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrig. Syst. 16: 33–45.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A. 1991. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York. 994 p.
- Esty, D.C., Levy, M., Srebotnjak, T. and de Sherbinin, A. 2005. *The 2005 Environmental Sustainability Index: Benchmarking National Environmental Stewardship*. New Haven: Yale Center for Environmental Law and Policy.
- Evans, J.P., McCabe, M.F., Mueller, B., Meng, X. and Ershadi, A. 2011. *A comparison of satellite evapotranspiration estimation efforts*. WIRADA Science Symposium Proceedings, Melbourne, Australia, 1–5 August 2011.
- Fox, D.G. 1981. *Judging air quality model performance: A summary of the AMS Workshop on Dispersion Model Performance*. Bull. Am. Meteorol.Soc. 62: 599-609.
- Garcia, M., Raes, D., Allen, R., Herbas, C. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). Agric. Forest Meteorol. 125, 67–82.
- Hargreaves, G.H. and Samani., Z.A. 1985. *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Appl. Eng. in Agr., 1(2): 96-99.
- Hsu, A., Emerson, J., Levy, M., de Sherbinin, A., Johnson, L., Malik, O., Schwartz, J. and Jaiteh, M. 2014. *The 2014 Environmental Performance Index*. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law and Policy.
- Irmak, A. and Irmak, S. 2008. *Reference and Crop Evapotranspiration in South Central Nebraska. II: Measurement and Estimation of Actual Evapotranspiration for Corn*. Irrigation and Drainage Engineering, (December), 700–715.
- Irmak, A., Ratcliffe, I., Ranade, P., Hubbard, K., Singh, R.K., Kamble, B. and Kjaersgaard, J. 2011. *Estimation of Land Surface Evapotranspiration with a Satellite Remote Sensing Procedure*. Papers in Natural Resources. Paper 297.
- Jensen, M.E. and Haise, H.R. 1963. *Estimating evapotranspiration from solar radiation*. Proc. American Society of Civil Engineering, J. Irrigation and Drainage Division. 89:15-41.
- Jensen, M.E., Burman, R.D. and Allen, R.G. (ed). 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70., American Society of Civil Engineers., New York, NY, 332 p.
- Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen, B., Allen, R.G., 1997. Computation of ET_0 under non ideal conditions. J. Irrig. Drain. Eng. 123: 394-400.
- Kustas, W.P. and Norman, J.M. 1996. *Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces*. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 41(4): 495–516. doi:10.1080/02626669609491522
- Linacre, E.T. 1977. *A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone*. Agricultural Meteorology, 18: 409–424. DOI: 10.1016/0002-1571(77)90007-3

- Mu, Q., Heinsch, F. A., Zhao, M. and Running, S. W. 2007. *Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data*. Remote Sensing of Environment, 111(4): 519–536. doi:10.1016/j.rse.2007.04.015
- Moran, E.F. and Brondizio, E. 1994. *Integrating Amazonian vegetation, land-use, and satellite data*. Bioscience, 44 (5): 329-338.
- Pereira, L., Perrier, A., Allen, R., and Alves, I. 1999. *Evapotranspiration: Concepts and Future Trends*. J. Irrig. Drain Eng., 125:2(45), 45-51. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1999)
- Priestly, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters*. Mon. Weather Rev. 100, pp. 82-92.
- Rana, G. and Katerji, N. 2000. *Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review*. European Journal of Agronomy, 13(2-3): 125–153. [http://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](http://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)
- Ramos, J.G., Cratchley, C.R., Kay, J.A., Casterad, M.A., Martínez-Cob, A. and Domínguez, R. 2009. *Evaluation of satellite evapotranspiration estimates using ground-meteorological data available for the Flumen District into the Ebro Valley of N.E. Spain*. Agricultural Water Management, 96(4): 638–652.
- Ravenga, C. 2005. *Developing indicators of ecosystem condition using geographic information systems and remote sensing*. Reg. Environ. Change 5(4): 205–214.
- Running S.W., Nemani R.R., Peterson D.L., Band L.E., Potts D.F., Pierce L.L. and Spanner M.A. 1989. *Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation*. Ecology, 70(4): 1090-1101.
- Tabari, H., Grismer, M. E. and Trajkovic, S. 2011. *Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions*. Irrigation Science, 31(2): 107–117.
- Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B., Frame, K., 2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. J. Irrig. Drain. Eng. 131 (1), 73–84.
- Thornthwaite, C.W. 1948. *An Approach Toward a Rational Classification of Climate*. Geog. Review 38: 55–94.
- Trajkovic, S. and Kolakovic, S. 2009. *Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations Under Humid Conditions*. Water Resources Management, 23(14): 3057–3067.
- Turc, L. 1961. *Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour*. (in French). Ann. Agron. 12:13-49.
- Valiantzas, J.D. 2013. *Simple ETo Forms of Penman's Equation without Wind and/or Humidity Data. II: Comparisons with Reduced Set-FAO and Other Methodologies*. J. Irrig. Drain. Eng., 139:9-19.
- Ventura, F., Spano, D., Duce, P. and Snyder, R.L. 1999. *An evaluation of common evapotranspiration equations*. Irrigation Science, 18(4): 163–170. <http://doi.org/10.1007/s002710050058>
- Walter, I.A., Allen, R.G., Elliott, R., Itenfisu, D., Brown, P., Jensen, M.E., Mecham, B., Howell, T.A., Snyder, R., Eching, S., Spofford, T., Hattendorf, M., Martin, D., Cuenca, R.H. and Wright, J.L. 2005. *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Final Report (ASCE-EWRI)*. Pr. Eds: Allen, R.G., Walter, I.A., Elliott, R., Howell, T., Itenfisu, D. and Jensen, M. Environmental and Water Resources Institute. 2005. Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration of the Environmental and Water Resources Institute.
- Willmott, C.J. and Wicks D.E. 1980. *An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California*. Physical Geography, 1: 59-73
- Willmott, C.J. 1981. *On the validation of models*. Phys. Geog., 2: 184-194.
- Willmott, C.J. 1982. *Some comments on the evaluation of model performance*. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63: 1309-1313.