

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (ET_o) ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΕΛΛΑΔΑ

Σταύρος Αλεξανδρής^{1✉}, Δημήτριος Τσεσμελής^{1,2}, Νικόλαος Σκόνδρας^{1,2}, Δημήτριος Σταματάκος^{1,2}, Κωνσταντίνα Βασιλάκου^{1,2}, Ιπποκράτης Γκώτσης^{1,2}, Βασιλεία Φασούλη¹, Ηλίας Βιτωράτος³, Κωνσταντίνος Χατζηθωμάς¹, Νικόλαος Προύτσος¹, Χρίστος Α. Καραβίτης¹

1. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής. Ιερά Οδός 75, Αθήνα 11855 ✉ stalex@aua.gr
2. Water Research & Application, Ιωνίας, Καρλόβασι Σάμου, 83200.
3. Syngenta Hellas A.E.B.E., Λ. Ανθούσας, Ανθούσα Αττικής 15349

Περίληψη

Μέχρι σήμερα, η χρήση δορυφορικών δεδομένων με στόχο την εκτίμηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής (actual evapotranspiration) ή της εξατμοδιαπνοής αναφοράς (reference evapotranspiration) έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο αριθμό ερευνών. Ωστόσο, η εφαρμογή και σύγκριση τριών εμπειρικών μεθόδων (Hargreaves, COPAIS και Valiatzas) με τη μέθοδο FAO56 Penman–Monteith με παράλληλη χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων πραγματοποιείται για πρώτη φορά. Η παρούσα εργασία αποσκοπεί να αποδείξει ότι οι εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ET_o μπορούν να εφαρμοστούν σε χωρικό επίπεδο με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων και να συνεισφέρουν στον ακριβή υπολογισμό των αναγκών άρδευσης των καλλιεργειών με σκοπό την εξοικονόμηση νερού στην γεωργία.

Λέξεις κλειδιά: Εξατμοδιαπνοή αναφοράς, Δορυφορικά δεδομένα, Επίγεια δεδομένα, Εμπειρικές μέθοδοι

COMPARATIVE ANALYSIS OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION (ET_o) USING TERRESTRIAL AND SATELLITE DATA IN CENTRAL GREECE

Stavros Alexandris^{1✉}, Demetrios Tsesmelis^{1,2}, Nikolaos Skondras^{1,2}, Demetrios Stamatakos^{1,2}, Constantina Vasilakou^{1,2}, Ippokratis Gkotsis^{1,2}, Vassilia Fassouli¹, Elias Vitoratos³, Costas Chatzithomas¹, Nikolaos Proutsos¹, Christos Karavitis¹

1. Agricultural University of Athens, Department of Natural Resources Development & Agricultural Engineering, 75 Iera Odos Av., 11855 Athens, Greece. ✉ stalex@aua.gr
2. Water: Research & Application, Ionias, Karlovasi Samos Island, 83200, Greece
3. Syngenta Hellas A.E.V.E., Anthoussa Av., 15349, Anthoussa, Attica, Greece

Abstract

Up to date, the use of satellite data in the calculation of the actual or reference evapotranspiration has been addressed by numerous researchers. However, the application of three empirical methods (Hargreaves, COPAIS and Valiatzas) and their comparison with the FAO56 Penman –Monteith method using both terrestrial and satellite data is presented for the first time. The present effort aims at highlighting the usefulness of the spatial application of those empirical methods which may contribute towards the accurate

determination of the crop water requirements and limit the uncontrollable wasting of that resource in the agricultural sector.

Key words: Reference Evapotranspiration, Satellite data, Terrestrial data, Empirical methods

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο αγροτικός τομέας, και κυρίως η άρδευση των καλλιεργειών, αποτελεί μια από τους σημαντικότερες πηγές κατανάλωσης νερού. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η άρδευση καταναλώνει περίπου το 24% του συνολικού μέσου ετήσιου όγκου νερού. Ωστόσο, η εντατική εφαρμογή της άρδευσης στην νότια Ευρώπη (Ελλάδα, Ιταλία, Πορτογαλία, Κύπρος, Ισπανία) ανεβάζει το ποσοστό αυτό στο 80%. Ο ακριβής προσδιορισμός των καθημερινών απαιτήσεων των καλλιεργειών σε νερό (Εξατμοδιαπνοή αναφοράς - ΕΤο) σε μικρό βήμα εκτίμησης (ημερήσιο) θα μπορούσε δυναμικά να περιορίσει την ανεξέλεγκτη άρδευση, αυξάνοντας παράλληλα την αποδοτικότητα των καλλιεργειών (Pereira et al, 1999). Ωστόσο, στην Ελλάδα, η έλλειψη επαρκών και έγκυρων δεδομένων αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα. Αυτό το κενό μπορεί να καλυφθεί με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων (Esty et al., 2005, Ravenga, 2005; Hsu et al., 2014; de Sherbinin et al., 2014).

Το πλεονέκτημα χρήσης δορυφορικών δεδομένων συνεισφέρουν στην βελτίωση του συστήματος παραγωγής αγροτικών προϊόντων, στηριζόμενα στη διαχείριση των εισροών σε επίπεδο αγρού σύμφωνα με τις πραγματικές υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Ένα σύστημα της γεωργίας ακριβείας στηρίζεται στην δυνατότητα που εξασφαλίζει η νέα τεχνολογία στο να διακρίνει την χωρική παραλλακτικότητα των αναγκών των καλλιεργειών. Κάτι ανάλογο θα ήταν αδύνατο μόνο με τη χρήση επίγειων δεδομένων (Moran and Brondizio, 1994). Ωστόσο, η παράλληλη χρήση επίγειων δεδομένων μπορεί να πιστοποιήσει την ακρίβεια των δορυφορικών δεδομένων.

Μέχρι σήμερα, η χρήση δορυφορικών δεδομένων με στόχο την εκτίμηση της πραγματικής εξατμοδιαπνοής (actual evapotranspiration) ή της εξατμοδιαπνοής αναφοράς (reference evapotranspiration) έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο αριθμό ερευνών (Bailey, 1990; Ramos et al., 2009; Blanta et al., 2011; Evans et al., 2011; Irmak et al., 2011). Ωστόσο, η εφαρμογή και σύγκριση τριών εμπειρικών μεθόδων (Hargreaves, COPAIS και Valiatzas) με τη μέθοδο FAO56 Penman-Monteith (FAO56PM) με παράλληλη χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων πραγματοποιείται για πρώτη φορά. Η παρούσα εργασία διερευνά την συμβολή εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ΕΤο σε ημερήσιο βήμα εκτίμησης, σε χωρικό επίπεδο με χρήση δορυφορικών δεδομένων και την δυνατότητα συνεισφοράς τους στον ακριβή υπολογισμό των αναγκών άρδευσης των καλλιεργειών με σκοπό την εξοικονόμηση νερού στην γεωργία.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στη παρούσα εργασία, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των εκτιμήσεων της ημερήσιας ΕΤο που προκύπτουν από επίγεια και δορυφορικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, η ΕΤο υπολογίζεται με την εφαρμογή τριών εμπειρικών μεθόδων με τη χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων. Οι εκτιμήσεις αυτές της ΕΤο συγκρίνονται με τη συνδυαστική μέθοδο ΕΤο - FAO56 PM όπως αυτή έχει προταθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Τροφίμων (FAO56 Irrigation and Drainage paper) και περιγράφεται από μεγάλο αριθμό ερευνητών (Pereira et al., 1996; Walter et al., 2005; Allen et al., 1998; Alexandris et al., 2008). Τα επίγεια δεδομένα για την εφαρμογή τόσο των τριών εμπειρικών μεθόδων όσο και της μεθόδου ΕΤο FAO56-PM, προέρχονται από τον πρότυπο αυτόματο Αγρομετεωρολογικό σταθμό (ΑΜΣ) 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.

Τα δορυφορικά δεδομένα για την εφαρμογή των τριών εμπειρικών μεθόδων έχουν διατεθεί από την εταιρεία Syngenta Hellas A.E.B.E. Αυτά καλύπτουν έκταση 770.06 km². Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι επιχειρήθηκε η εκτίμηση ημερήσιων τιμών ΕΤ_ο και με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων για την μέθοδο FAO56 PM για τις αντίστοιχες εκτιμήσεις με τα επίγεια δεδομένα. Όλες οι συγκριτικές αξιολογήσεις των μεθόδων καλύπτουν τη χρονική περίοδο του περασμένου έτους (01/01/2014 – 31/12/2014).

2.1. Μέθοδοι Υπολογισμού Εξατμοδιαπνοής

2.1.1. FAO56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998)

Η εξίσωση FAO56-PM για τον υπολογισμό της ΕΤ_ο σε ημερήσια βάση έχει τη μορφή της εξίσωσης 1.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

Όπου, ο όρος ΕΤ_ο αναφέρεται στην εξατμοδιαπνοή (mm day⁻¹), R_n είναι η καθαρή ακτινοβολία στην επιφάνεια της καλλιέργειας (MJ m⁻²day⁻¹), G είναι η πυκνότητα της ροής θερμότητας του εδάφους (MJ m⁻²day⁻¹), T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα σε υψόμετρο 2 μέτρων (°C), u₂ είναι η ταχύτητα του ανέμου σε υψόμετρο 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 (kPa°C⁻¹) και γ είναι ο ψυχομετρικός συντελεστής (kPa°C⁻¹). Η ημερήσια πυκνότητα ροής θερμότητας του εδάφους λαμβάνεται G=0.

2.1.2. Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985)

Η εξίσωση Hargreaves (1975) η οποία τροποποιήθηκε το 1985 για συνθήκες γρασιδιού και απαιτεί μετρήσεις θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας ακολουθεί την εξίσωση 2.

$$ET_o = 0.0023(T_{max} - T_{min})^{0.5}(T_m + 17.8)R_a \quad (2)$$

T_{avg}, T_{max} και T_{min} είναι η μέση, η μέγιστη και η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα (°C) αντίστοιχα και η R_a είναι η ακτινοβολία στο εξωτερικό όριο της ατμόσφαιρας (mmday⁻¹) εκτιμώμενη από το γεωγραφικό πλάτος και την ημέρα του έτους (DOY).

2.1.3 Copais (Alexandris et al., 2006)

Η μορφή της συγκεκριμένης μεθόδου για τον υπολογισμό της ημερήσιας ΕΤ_ο εκφράζεται από την εξίσωση 3 καθώς και από τις εξισώσεις 3α και 3β.

$$ET_o = m_1 + m_2 C_2 + m_3 C_1 + m_4 C_1 C_2 \quad (3)$$

Όπου m₁ = 0.057, m₂ = 0.277, m₃ = 0.643, m₄ = 0.0124 και

$$C_1 = 0.6416 - 0.00784RH + 0.372R_s - 0.00264R_s RH \quad (3a)$$

$$C_2 = -0.0033 + 0.00812T + 0.101R_s + 0.00584R_s T \quad (3b)$$

RH είναι η μέση σχετική υγρασία (%), R_s είναι η μέση ηλιακή εισερχόμενη ακτινοβολία (MJ m⁻²day⁻¹) και T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα (°C).

2.1.4. Valiantzas (Valiantzas, 2013)

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου εκφράζεται από την εξίσωση 4 η οποία δεν απαιτεί δεδομένα για τη ταχύτητα ανέμου.

$$ET_o \approx 0.0393R_s \sqrt{T + 9.5} - 0.19R_s^{0.6} \phi^{0.15} + 0.078(T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (4)$$

Όπου, R_s είναι η ηλιακή ακτινοβολία (MJ m⁻²day⁻¹), T είναι η θερμοκρασία αέρα (°C), RH είναι η σχετική υγρασία (%) και φ το γεωγραφικό πλάτος σε rad.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

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.

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

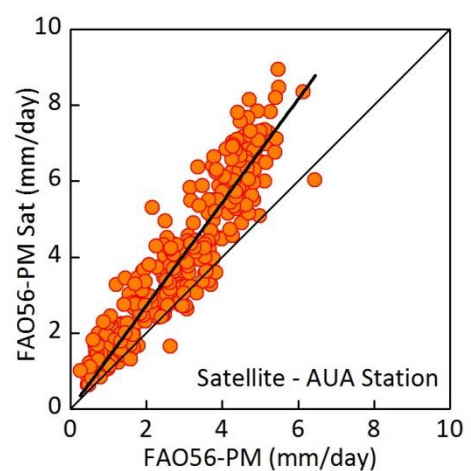
	Min		Max		Mean		Std. Dev		Range	
	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT	ΑΑΣ	SAT
T_{avg}	0.5	2.1	31.4	30.1	17.0	17.3	6.5	6.7	30.9	28.0
T_{max}	1.0	3.4	40.4	40.1	23.9	23.4	7.7	7.8	39.4	36.7
T_{min}	-1.1	-0.5	21.3	23.6	10.1	11.9	5.6	5.8	22.4	24.1
RH	31.7	35.0	100.0	91.0	76.0	67.5	13.8	13.9	68.3	56.0
RH_{max}	61.8	51.0	100.0	98.0	98.5	83.9	5.1	10.4	38.2	47.0
RH_{min}	10.4	12.0	100.0	86.0	46.4	47.0	19.0	16.6	89.5	74.0
u_2	0.0	1.3	3.3	8.1	0.8	2.7	0.5	1.0	3.3	6.8
R_s	12.0	42.0	358.2	343.4	191.8	203.6	103.2	87.9	346.2	301.4

Με βάση το συντελεστή Pearson (r), διαπιστώνεται ότι οι μέσες ημερήσιες τιμές όλων των κλιματικών επίγειων παραμέτρων παρουσιάζουν πολύ ικανοποιητική συσχέτιση με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις που προέρχονται από τα δορυφορικά δεδομένα: T_{avg} (0.986), T_{max} (0.981), T_{min} (0.940), RH_{avg} (0.869), RH_{min} (0.842), R_s (0.957). Αντίθετα, η RH_{max} του σταθμού παρουσιάζει πολύ μικρή συσχέτιση με την αντίστοιχη μέση εκτίμηση του δορυφόρου (0.276). Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη των υγρών συνθηκών του υπερκείμενου μικροκλίματος στον σταθμό (ΑΑΣ) που «ενθαρρύνεται» από την πλήρη επάρκεια εδαφικού νερού λόγω διαπνοής (ενεργό γρασίδι ύψους 8-12 cm) όλο τον χρόνο, και ιδιαίτερα στους θερμούς μήνες. Τέλος, η ταχύτητα του ανέμου ($u_2 - u_{sat}$) παρουσιάζει μέτρια συσχέτιση μεταξύ των επίγειων και δορυφορικών δεδομένων (0.647).

3.1. Σύγκριση FAO56-PM vs FAO56-PM_{sat}

Η Εικόνα 1 εμφανίζει την γραμμική τάση και διασπορά που προκύπτει από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις ΕΤο (FAO56-PM vs FAO56-PM_{sat}) όπως προκύπτουν από την χρήση επίγειων και δορυφορικών δεδομένων. Είναι εμφανές ότι η FAO56-PM_{sat} υπερεκτιμά κατά 38.9 % στο σύνολο του έτους συστηματικά το άθροισμα της ΕΤο που προκύπτει από τα επίγεια δεδομένα κατά 358,64 mm (1280.7 mm και 922.0 mm αντίστοιχα).

Εν συνεχεία επιχειρήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των εμπειρικών μεθόδων σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς. Η 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). 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) και το μέσο σφάλμα μεροληψίας (mean bias error-MBE). Οι παράμετροι



Εικόνα 1. Γραμμική διασπορά FAO56-PM vs FAO56-PM SAT

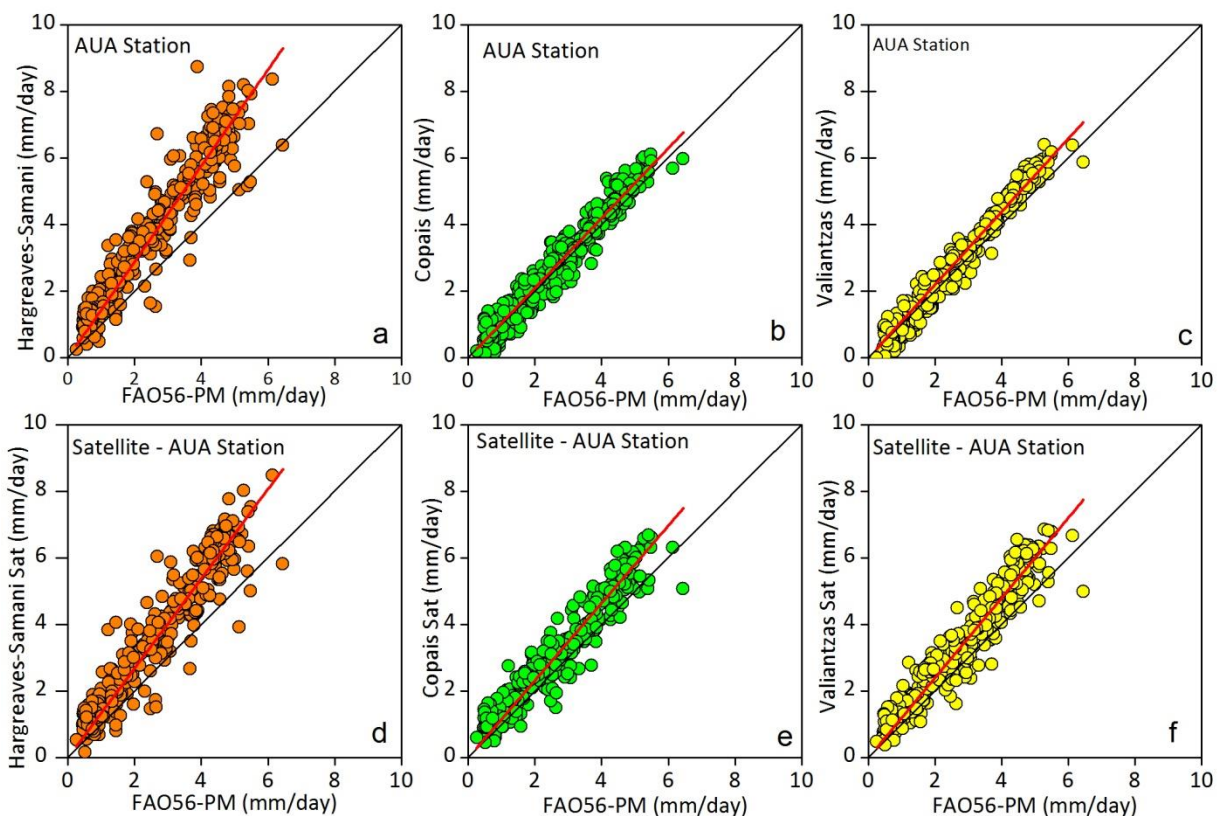
συμπληρώνονται με την κλίση της γραμμικής παλινδρόμησης (a) και intercept (b), R^2 και εμφανίζονται στον Πίνακα 2 για όλες τις συγκρίσεις.

Πίνακας 2. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης των συγκρινόμενων εμπειρικών μεθόδων έναντι της FAO56PM (ΑΑΣ).

	a	b	MBE	RMSE	MAE	Sd 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	1.084	-0.121	0.091	0.413	0.343	0.162	0.984	0.952
Valiantzas	1.167	-0.245	0.178	0.443	0.382	0.165	0.983	0.972
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}	1.082	0.279	0.485	0.682	0.562	0.229	0.958	0.930
Valiantza _{SAT}	1.136	0.226	0.569	0.781	0.636	0.286	0.948	0.929

3.2. Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων ΕΤο - ΑΑΣ & SAT

Από τη σύγκριση εκτίμησης της ΕΤο των τριών εμπειρικών μεθόδων σε ημερήσιο βήμα υπολογισμού (Hargreaves, Copais, Valiantzas), έναντι της επιλεγόμενης μεθόδου αναφοράς FAO56-PM προέκυψαν οι αποκλίσεις των γραμμικών τάσεων όπως εμφανίζονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2. Σύγκριση των εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ΕΤο (mm/day) από επίγεια (a,b,c) και δορυφορικά δεδομένα (d,e,f) σε σχέση με την FAO56-PM (δεδομένα ΑΑΣ).

Η χρήση επίγειων δεδομένων των μέσων ημερήσιων τιμών (T, RH, Rs) από τον σταθμό (ΑΑΣ) έδωσε μια ελάχιστη υπερεκτίμηση των εμπειρικών μεθόδων Copais (+3.6%) και Valiantzas (7.05%) σε ετήσια βάση ενώ η υπερεκτίμηση της μεθόδου (απουσία RH) Hargreaves-Samani ανήλθε στο +48.7% χαρακτηριζόμενη ως υπέρμετρα υψηλή. Αντίστοιχοι

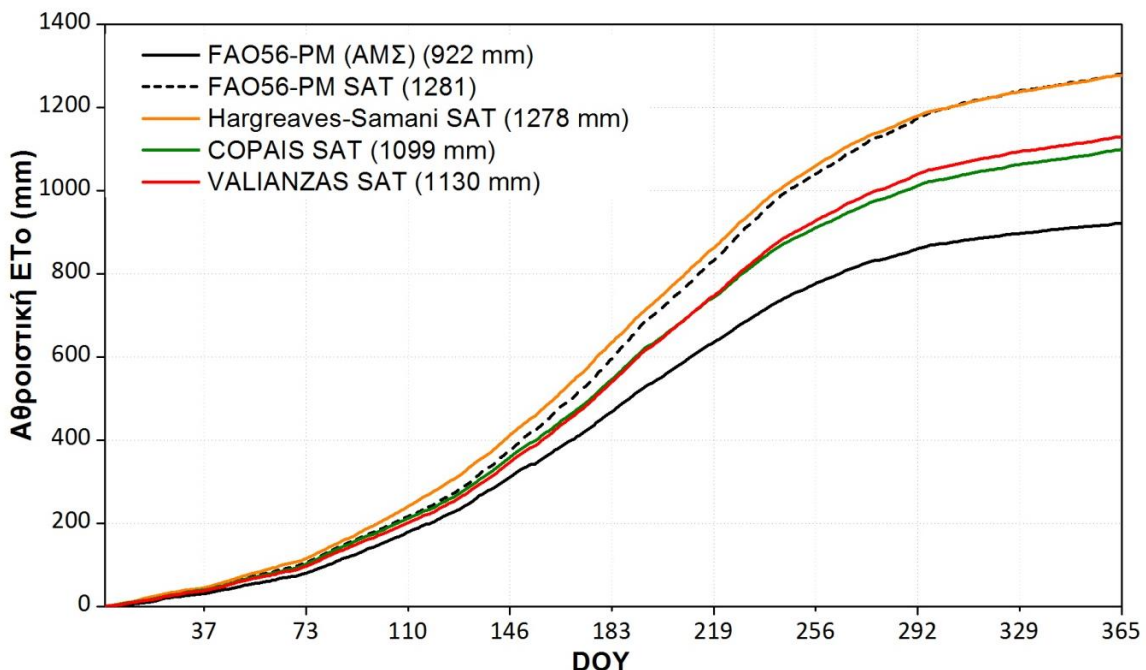
υπολογισμοί με την χρήση των δορυφορικών δεδομένων για το ίδιο ακριβώς διάστημα δίνουν εκτιμήσεις με αρκετή διαφοροποίηση των δύο πρώτων μεθόδων, COPAIS +19.20% και Valiantzas 22.52% και την Hargreaves-Samani να παρουσιάζει μείωση κατά 10% στην υπερεκτίμηση +38.56%.

Δεδομένου ότι η συνολική ΕΤο για της μεθόδου αναφοράς (δεδομένα ΑΜΣ) FAO56-PM ήταν 922.04 mm οι αντίστοιχες ετήσιες αθροιστικές εκτιμήσεις των διαδοχικών ημερήσιων ρυθμών εξατμοδιαπνοής αναφοράς των μεθόδων με τα συνολικά ποσοστά υπερεκτίμησης αυτών παρουσιάζονται στο πίνακα 3 και στην εικόνα 3.

Πίνακας 3. Ετήσια εκτίμηση ΕΤο (mm/year) και ποσοστά υπερεκτιμήσεων των μεθόδων σε σχέση με την μέθοδο αναφοράς (ref).

Προέλευση δεδομένων	ΕΤο (mm/year)			
	FAO56-PM	Hargreaves	Copais	Valiantzas
ΑΜΣ(επίγεια)	922 (Ref)	1371 (+49%)	955 (+3.6%)	987 (+7.0%)
SAT(δορυφόρου)	1281 (+39%)	1277 (+38%)	1099 (+17%)	1130 (+22%)

Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται οι ημερήσιες αθροιστικές εκτιμήσεις εξατμοδιαπνοής αναφοράς όλων των μεθόδων για το έτος 2014 στον Αλίαρτο από το σταθμό ΑΑΣ.



Εικόνα 3. Οι διαφορές που προκύπτουν στο άθροισμα της ΕΤο από όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ως προς την FAO56 Penman –Monteith (επίγεια δεδομένα ΑΜΣ)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει αλλά και να επισημάνει την σπουδαιότητα αλλά και την δυνατότητα εφαρμογής ορισμένων εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ΕΤο σε χωρική εκτίμηση με τη χρήση απλών δορυφορικών κλιματικών παραμέτρων ώστε να συνεισφέρουν στον ακριβή υπολογισμό των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Οι εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ΕΤο όπως είναι εμφανές ότι υπερτερούν συγκριτικά με τη μέθοδο αναφοράς (FAO56-PM) με την χρήση δορυφορικών δεδομένων. Αυτό οφείλεται πρωτίστως στην δυσκολία να αποτυπώσει ο δορυφόρος την πραγματική ταχύτητα του ανέμου πάνω από την καλλιέργεια. Δευτερευόντως η μέθοδος

Penman-Monteith παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις παραμέτρους πυκνότητας ροής καθαρής ακτινοβολίας που σχετίζεται με το έδαφος (π.χ. εδαφική ροή, ανακλαστικότητα επιφάνειας, μεγάλου μήκους ακτινοβολία (θερμοκρασία, ακτινοβολία, σχετική υγρασία). Τα εμπειρικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη την σχετική υγρασία μπορούν να προσεγγίσουν ικανοποιητικά την ψυχομετρία της ατμόσφαιρας πάνω από την καλλιέργεια καθώς οι δορυφορικές εκτιμήσεις θερμοκρασίας σχ. Υγρασίας είναι πολύ ικανοποιητικές.

Τα αποτελέσματα αυτής της διερευνητικής προσέγγισης, με περιοχή εφαρμογής ένα πολύγωνο αγροτικής περιοχής (Αλίαρτο Βοιωτίας), έδειξαν ότι κάποιες από τις εμπειρικές μεθόδους που εξετάστηκαν μπορούν να αποφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και να γίνουν χρήσιμα εργαλεία. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις προσεγγίσεις που πραγματοποιήθηκαν, αποδεικνύεται ότι οι μέθοδοι Copais και Valiantzas, προσεγγίζουν αξιόλογα τις τιμές ΕΤο των επίγειων εκτιμήσεων της μεθόδου FAO56-PM αλλά συγχρόνως διαπιστώνεται και η ικανοποιητική προσέγγιση των τιμών εξατμοδιαπνοής αναφοράς σε αντίθεση με την απόδοση της FAO56-PM όταν γίνεται χρήση δορυφορικών δεδομένων (FAO56-PM_{SAT}). Αντίθετα, η μέθοδος Hargreaves-Samani και στις δύο περιπτώσεις εμφανίζει σημαντική απόκλιση, επισημαίνοντας και την σημασία της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας ως απαραίτητη και θεμελιώδη παράμετρο.

Ωστόσο, προτείνεται εκτενέστερη έρευνα προκειμένου να προκύψουν σημαντικότερα ευρήματα καθώς η τεχνολογία εξέλιξης των αισθητήρων των δορυφόρων είναι ταχεία και συνεπώς αναβαθμίζεται ο ρόλος των εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ΕΤο στο μέλλον.

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.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alexandris S., Kerkides, P., and Liakatas, A. 2006. Daily reference evapotranspiration estimates by the "Copais" approach. *Agricultural Water Management*, Volume 82, Issue 3, 24, Pages 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, 2008
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- Esty, D.C., Levy, M., Srebotnjak, T. and de Sherbinin, A. 2005. 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.
- Hargreaves, G.H., and Z.A. Samani., 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., 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*. Paper297. <http://digitalcommons.unl.edu/natrespapers/297>
- Moran, E.F. and Brondizio, E. 1994. Integrating Amazonian vegetation, land-use, and satellite data. *Bioscience*, 44 (5):p329 – 338.
- Pereira L.S., Alain, S., Perrier A. and Allen, R.G. 1999. Evapotranspiration: Concepts and Future Trends. *Journal Of Irrigation and Drainage Engineering / March/April 1999 /51*.
- Pereira, L.S., Perrier, A., Allen, R.G. and Alves, I. 1996. Evapotranspiration: Review of concepts and future trends. *J. Irrig. And Drain. Engrg.*, ASCE 25.
- Ramos, J.G., Cratchley, C.R., Kay, J.A., Casterad, M.A., Martínez-Cob, A., 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* 5 205–14
- 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.* 2013.139:9-19.
- 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 D.E. Wicks, 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.