

ΛΟΓΟΙ ΕΣΦΑΛΜΕΝΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

Σ. Αλεξανδρής¹, Ν. Προύτσος¹, Χ. Καραβίτης¹, Ι. Τσίρος² και Δ. Σταματάκος¹

¹ Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Τμήμα Αξιοποίησης φυσικών πόρων & Γεωργικής Μηχανικής.

² Εργαστήριο Γεωργικής Μετεωρολογίας, Γενικό Τμήμα.

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 118 55 Αθήνα

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) και τα πρωτόκολλα εκτίμησής της απαιτούν οι σχετικές μετεωρολογικές παράμετροι να μετρώνται πάνω από πρότυπες επιφάνειες αναφοράς (γρassίδι ή μηδική). Στην Ελλάδα και σε αρκετές Μεσογειακές χώρες τέτοια υπόβαθρα θέσεων αναφοράς και αντίστοιχα πρότυπα αγρομετεωρολογικά δίκτυα είναι από σπανιότατα έως ανύπαρκτα. Μια τέτοια πρακτική οδηγεί στη χρήση μη αξιόπιστων δεδομένων για τον υπολογισμό της ET_0 από μη πλήρως τυποποιημένες, σύμφωνα με τα πρωτόκολλα, τοποθεσίες, οπότε οι εκτιμήσεις της ET_0 να οδηγούνται σε σημαντικά και συστηματικά σφάλματα υπολογισμού των αναγκών των καλλιεργειών σε νερό. Οι συνέπειες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για την άρδευση, που χρησιμοποιεί κατά μέσο όρο πάνω από το 85% της συνολικής κατανάλωσης νερού στην χώρα μας. Επιπλέον, οι υφιστάμενοι μη αξιόπιστοι μετεωρολογικοί σταθμοί δεν κατανέμονται ομοιόμορφα, αλλά πολλές φορές συγκεντρώνονται σε μη αγροτικές περιοχές και κυρίως πλησίον οικισμών. Οι ελλείψεις αυτές των κατάλληλων δεδομένων οδηγούν σε ανορθόδοξες και πολλές φορές λανθασμένες, εκτιμήσεις της ET_0 στις αγροτικές περιοχές. Η παρούσα εργασία συγκρίνει μετεωρολογικά δεδομένα και εκτιμήσεις ET_0 μιας επαρκώς αρδευόμενης χαμηλής καλλιέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις πάνω από ξηρό και γυμνό έδαφος, κάτω από τις ίδιες τοπικές συνθήκες. Επίσης διερευνά διεξοδικά την επίδραση της επιφάνειας του υποβάθρου επί των μετεωρολογικών παραμέτρων που συμμετέχουν στον υπολογισμό του ρυθμού ET_0 με χρήση του μοντέλου Penman-Monteith (FAO56-PM), καθώς επίσης και με την χρήση της εμπειρικής μεθόδου Hargreaves. Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης έδειξαν ότι η υπερεκτίμηση της ET_0 μπορεί να κυμανθεί από 27% έως και 47% κατά την διάρκεια των θερμών περιόδων, όπου σημειώνονται και οι μέγιστες απαιτήσεις άρδευσης και να οδηγήσει σε αντίστοιχη υπερκατανάλωση νερού.

Λέξεις κλειδιά: Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_0 , Καλλιέργειας ET_c , Μέθοδος Penman-Monteith FAO56-PM, Μέθοδος Hargreaves, Θερμοκρασία αέρα, Σχετική Υγρασία, Ταχύτητα ανέμου, Καθαρή ακτινοβολία.

REASONS FOR NON-RATIONAL ESTIMATES OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN GREECE

S. Alexandris¹, N. Proutsos¹, Ch. Karavitis¹, I. Tsiros² and D. Stamatakos¹.

¹ Lab of Agricultural Hydraulics, Department of Natural Resources & Agricultural Engineering

² Lab of Agricultural Meteorology, Department of Science

Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 118 55 Athens, GREECE

The calculation of reference Evapotranspiration (ET_0) and the measurement protocols require meteorological parameters to be taken over standardized vegetation surfaces (grass or alfalfa reference). Unfortunately, in Greece and in many Mediterranean areas such vegetation-reference sites and standardized agro-meteorological networks are rare or non-existent. Such a practice leads to the use of inappropriate data for ET_0 estimations from non ideal sites (*non-conforming to standardization*) and consequently, to significant and systematic cumulative errors in determining crop water requirements and irrigation scheduling. Furthermore, the existing inappropriate meteorological stations are not uniformly distributed and rather concentrated in non-rural areas and mostly in agglomerations. Consequently, there is a lack of suitable data leading to non-compatible ET_0 estimations in many agricultural regions. Present work compares meteorological attributes and reference evapotranspiration calculations (FAO56 Penman-Monteith, Hargreaves equations) of a well-watered short crop with those over a dry bare soil, under the same local environment. The results show that the overestimation of the ET_0 and therefore the over-consumption of irrigation water can oscillate from 27% up to 47% during the warm season, with maximum irrigation requirements.

Keywords: Reference Evapotranspiration ET_0 , Crop ET_c , Penman-Montheith method, Hargreaves method, Air temperature, Air relative Humidity, Wind speed, Net Radiation.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τυποποίηση των επιφανειών επί των οποίων είναι εγκατεστημένοι αγρομετεωρολογικοί σταθμοί είναι επιβεβλημένη λόγω της χωρικής και χρονικής μεταβλητότητας ουσιαστικών παραγόντων που επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0). Η μεταβλητότητα αυτή δημιουργεί δυσκολίες στην χρήση και στην ακριβή απόδοση των σχετικών προτεινόμενων εξισώσεων για την εκτίμηση της ET_0 .

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ET_0 περιλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία του αέρα, τη σχετική υγρασία, και την ταχύτητα του ανέμου. Αυτές οι παράμετροι είναι άκρως αλληλένδετες με τη φύση και τις ιδιότητες των επιφανειών επί των οποίων λαμβάνονται οι μετρήσεις τους, καθώς είναι και εκείνες οι παράμετροι που ουσιαστικά στηρίζουν αναμφίβολα όλο το θεωρητικό υπόβαθρο του πιο αξιόπιστου μοντέλου για την

εκτίμηση της εξαμισοδιαπνοής αναφοράς: της μεθόδου Penman–Montteith (Allen et al., 1998). Ένας σταθμός εγκατεστημένος σε ξηρό περιβάλλον θα αποτυπώνει υψηλότερες τιμές θερμοκρασίας και αντίστοιχα χαμηλότερες τιμές σχετικής υγρασίας σε σχέση με ένα σταθμό που βρίσκεται σε μια καλά αρδευόμενη βλάστηση (Allen, 1996; Yoder et al., 2000). Οι περισσότερες επιρροές λοιπόν από τις μετεωρολογικές συνθήκες είναι ενσωματωμένες στην εκτίμηση της ET_0 και συνεπώς η ET_0 ουσιαστικά αποτελεί μία κλιματική παράμετρο που εκφράζει την εξαμισιακή ισχύ της ατμόσφαιρας σε ένα συγκεκριμένο τόπο και χρόνο έχοντας ως δεδομένο τα χαρακτηριστικά μιας καλλιέργειας αναφοράς που αποτελεί το τυποποιημένο υπόβαθρο των μετρήσεων (Allen et al., 1998).

Το βασικότερο, όμως και ουσιαστικότερο κριτήριο για την απόδοση όλων των σχετικών “κλιματικών” εξισώσεων που αποδίδουν τους ρυθμούς εξαμισοδιαπνοής αναφοράς είναι η επάρκεια νερού στο ριζόστρωμα καλλιέργειας αναφοράς. Κάτω από τέτοιες εδαφικές συνθήκες θα μπορούσε να εκφραστεί η μέγιστη δυνατότητα απώλειας νερού από ένα τυποποιημένο υπόβαθρο καλλιέργειας και έτσι μόνον θα μπορούσαν να αποδοθούν στην πράξη οι πραγματικές εκτιμήσεις της ET_0 και ο ουσιαστικός ρόλος της στην εξοικονόμηση αρδευτικού νερού.

Παγκοσμίως, οι ερευνητές έχουν αποδεχθεί την χρήση γρασιδιού (*cool season grass- bluegrasses, fescues, and ryegrasses*) και της μηδικής (*alfalfa-Medicago sativa*) ως πρότυπες επιφάνειες (Allen et al., 2006), λόγω της προσαρμοστικότητάς τους σε διάφορα κλιματικά καθεστώτα και λόγω της βιοφυσικής τους ομοιότητας με πολλές γεωργικές καλλιέργειες. Οι απαιτήσεις αυτών των τυποποιημένων επιφανειών όχι μόνο δεν αποτελούν «υποθετικές» επιφάνειες αναφοράς αλλά έχουν σχεδιασθεί και προταθεί για να προσομοιώσουν ένα κοινό σημείο αναφοράς μεταξύ των διαφορετικών μικροκλιματικών συνθηκών ανά τον κόσμο και του μέγιστου ρυθμού υδατοκατανάλωσης των διαφόρων καλλιεργειών που αναπτύσσονται κάτω από αυτές τις συνθήκες. Ο γνωστός συντελεστής καλλιέργειας (K_c) αποτελεί τον αναγωγικό μέσο μεταξύ της ET_0 και του δυναμικού ρυθμού εξαμισοδιαπνοής για όλα τα στάδια ανάπτυξης κάθε καλλιέργειας και αντιπροσωπεύει σε ένα τόπο, την σφαιρική επιρροή τεσσάρων βασικών χαρακτηριστικών που τον διαφοροποιούν από την καλλιέργεια αναφοράς. (ύψος καλλιέργειας, ανακλαστικότητα (*albedo*), αντίσταση φυτοκόμης, εξάτμιση από γυμνό έδαφος).

Σήμερα οι ανάγκες σε νερό άρδευσης συνήθως καθορίζονται αποκλειστικά μέσω διαδικασιών εκτίμησης της εξαμισοδιαπνοής αναφοράς και απαιτούν σταθμούς εγκατεστημένους σε τυποποιημένες επιφάνειες βλάστησης. Οι περισσότερες περιοχές της Μεσογείου δεν διαθέτουν τέτοιες τυποποιημένες επιφάνειες, λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης και συντήρησης. Αυτό έχει ως συνέπεια να γίνεται συστηματική χρήση ακατάλληλων κλιματικών δεδομένων προκαλώντας συσσωρευμένα σφάλματα όχι μόνο στο

προγραμματισμό των αρδεύσεων αλλά και στην εκτίμηση του ενεργειακού ισοζυγίου μιας περιοχής.

Η εργασία αυτή στοχεύει στο να αναδείξει και να επισημάνει την επίδραση των χαρακτηριστικών μιας επιφάνειας στην εκτίμηση της ET_0 .

2. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Θέση των μετεωρολογικών σταθμών.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από δύο μετεωρολογικούς σταθμούς εγκατεστημένους στο νομό Αρκαδίας. Ειδικότερα ο πρώτος σταθμός της Εθνικής Μετεωρολογικής υπηρεσίας (EMY) με ID: WMO-16710/TRIPOLIS AP, εγκατεστημένος σε υψόμετρο 650,87m με Γ.Σ. 37°32'0" Β και 22°24' 00" Α .



Εικόνα 1. Μετεωρολογικός σταθμός Ε.Μ.Υ. στο αεροδρόμιο της Τρίπολης με υπόβαθρο επιφάνειας αναφοράς το ξηρό έδαφος.

Ο Δεύτερος αυτόματος μικρομετεωρολογικός σταθμός του τομέα Διαχείρισης Υδατικών πόρων του Γ.Π.Α (Εικ.2) ήταν εγκατεστημένος σε πειραματικό αγρό στην περιοχή Ζουπάνους, (2004 έως και το 2006), με Γ.Σ. 37°33'11" Β και 22°25' 29" Α σε υψόμετρο 641 μέτρων.



Εικόνα 2. Αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός Γ.Π.Α. (AUA) εγκατεστημένος σε υπόβαθρο με χαμηλή πράσινη βλάστηση και με πλήρη επάρκεια εδαφικής υγρασίας, σε όλη την διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Όπως προκύπτει διανυσματικά από τις γεωγραφικές συντεταγμένες των δύο σταθμών η μεταξύ τους απόσταση τους υπολογίστηκε σε 3,85 χιλιόμετρα, με τον σταθμό του ΓΠΑ να βρίσκεται ΒΑ του αντίστοιχου σταθμού της ΕΜΥ (περίπου 43°).

2.2. Ημερήσιες κλιματικές παρατηρήσεις

2.2.1. Μετεωρολογικός σταθμός ΕΜΥ

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν από το σταθμό τύπου "Stevenson screen" της ΕΜΥ (Εικ.1) είναι ή μέση ημερήσια θερμοκρασία T_{avg} που εκτιμήθηκε από το μέσο όρο των παρατηρήσεων για την τυπική χειμερινή ώρα (UTC+2) T_{08}, T_{14}, T_{20} : $T_{avg} = (T_{08} + T_{14} + 2T_{20})/4$, η μέγιστη και ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία, T_{max} και T_{min} , η μέση ημερήσια σχετική υγρασία, RH_{avg} , και η μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου στο ύψος των δύο μέτρων, U_2 .

2.2.2. Μετεωρολογικός σταθμός ΑUA.

Στο κέντρο του αγρού πατατοκαλλιέργειας (Εικ.2) εγκαταστάθηκε αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός (Minimet_2, Skyeinstruments) με μονάδα καταγραφής Datahog_2, SDL_5400, για τη λήψη μετρήσεων με συχνότητα δειγματοληψίας 10s (8640 αναγνώσεις ανά 24ωρο για κάθε μετρούμενη παράμετρο) και αποθήκευση μέσω των τιμών 10λέπτου (Προύτσος κ.ά, 2009). Από τον μετεωρολογικό σταθμό ΑUA, για την αντίστοιχη χρονική περίοδο εκτιμήθηκαν οι μέσες ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας T_{avg} της σχετικής υγρασίας, RH_{avg} , μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας T_{max} και T_{min} και της ανεμοταχύτητας στο ύψος των δύο μέτρων, U_2 . Επίσης, η μέση ημερήσια πυκνότητα ροής της ολικής εισερχόμενης ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος R_s [W/m^2] μετρήθηκε από πυρανόμετρο τύπου SKS 1110 (350-1100nm). Επισημαίνεται δε ότι η βαθμονόμηση του αισθητήρα αναφέρεται σε ηλιακή ενέργεια στην περιοχή μηκών κύματος 300-3000nm, δηλαδή τη ζώνη αποδοχής των πυρανόμετρων Α' τάξης.

2.3. Μεθοδολογία

Στόχος της εργασίας είναι να μελετηθεί η επίδραση της "επιφάνειας αναφοράς" στα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_o και κατ'επέκταση στον προσδιορισμό των αναγκών σε νερό των καλλιεργειών (εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας ET_c) σε τοπικό περιβάλλον. Η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας ET_c στην συγκεκριμένη εργασία εκτιμήθηκε άμεσα από την σχέση FAO-56 PM (Allen et al., 1998; ASCE-EWRI, 2005):

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot U_2 \cdot (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot U_2)} \quad [1]$$

Στη σχέση (1) χρησιμοποιήθηκαν όλα τα γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας (ύψος, δείκτη φυλλικής επιφάνειας, αντίσταση στοματίων, επάρκεια εδαφικής υγρασίας). Ο υπολογισμός της ροής καθαρής ακτινοβολίας R_n έγινε σύμφωνα με την εργασία FAO-56 paper (Allen et al., 1998, equation 40, p.53) από την σχέση:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad [2]$$

Η ροή θερμότητας στο έδαφος λαμβάνεται μηδενική για ημερήσιο βήμα εκτίμησης της ET_o . Η

εκτίμηση της R_n που προέρχεται από τις τιμές της ολικής ακτινοβολίας R_s για τις επιφάνειες αναφοράς των δύο σταθμών, διαφοροποιείται αρχικά από την ανακλαστικότητα της επιφάνειας (albedo), όπου η τιμή για το γυμνό έδαφος (ΕΜΥ) και την καλλιέργεια (ΑUA) εκτιμήθηκε σε 0.17 και 0.23 αντίστοιχα. Η ανακλαστικότητα επηρεάζει αποκλειστικά τον όρο της καθαρής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος R_{ns} , ενώ η διαφοροποίηση της καθαρής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους ροής ακτινοβολίας οφείλεται στην θερμοκρασία και στη σχετική υγρασία που επικρατεί πάνω από τις δύο επιφάνειες και εκφράζεται στον όρο της R_{nl} από την τάση των πραγματικών υδρατμών (e_a) που επικρατούν πάνω από αυτές.

Οι τιμές εκτίμησης της ET_c στον πειραματικό αγρό (ΑUA) δύναται να θεωρηθούν πολύ παραπλήσιες με εκείνες τις τιμές εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o που λαμβάνονται από γρασίδι αναφοράς ύψους 8 cm, καθώς ο συντελεστής καλλιέργειας K_c των φυτών της πατάτας στο μέγιστο στάδιο ανάπτυξης λαμβάνει περίπου την τιμή 1, δηλαδή $ET_c / ET_o \cong 1$ (Kashyap and Panda, 2001). Συνεπώς οι μέγιστες τιμές που λαμβάνονται από την καλλιέργεια στον πειραματικό αγρό δύναται να αποδώσουν επαρκώς τις τιμές εξατμισοδιαπνοής που λαμβάνονται πάνω από μια πρότυπη επιφάνεια γρασιδιού ύψους 8-12 cm κάτω από συνθήκες πλήρους επάρκειας νερού (*δυναμικός ρυθμός απώλειας νερού*).

Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε και εκτιμήθηκε ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής (ET_o) της μεθόδου Hargreaves, (Hargreaves & Samani, 1985) ώστε να διαπιστωθούν οι διαφορές που θα προέκυπταν σε σχέση με την χρήση της μεθόδου FAO-56 PM στην περίπτωση που η έλλειψη δεδομένων καθιστούσε αδύνατη τη χρήση της προτεινόμενης πρότυπης μεθόδου. Η μέθοδος αυτή όπως εναλλακτικά προτείνεται από την ASCE μπορεί να δοθεί από την η σχέση [3], συναρτήσει της διαφοράς μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας θερμοκρασίας, της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και της ακτινοβολίας στο εξωτερικό της ατμόσφαιρας R_a . Απαιτείται μόνο το γεωγραφικό πλάτος για την εκτίμηση των ημερήσιων τιμών της. Η R_a εισάγεται στη σχέση σε mm^1 :

$$ET_o \text{ (mm/d)} = 0.0023 \cdot (T_{avg} + 17.8) (T_{max} - T_{min}) R_a \quad [3]$$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

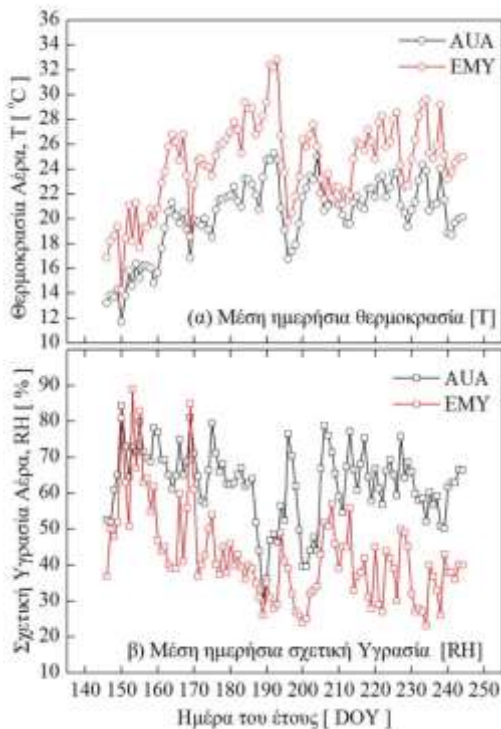
3.1 Συγκριτική ανάλυση των παρατηρήσεων

Στην εργασία αυτή επιχειρείται μια συγκριτική και αναλυτική αξιολόγηση των πρωτογενών δεδομένων που συμμετέχουν στις μεθόδους εκτίμησης ET_o που εκφράζονται από τις εξισώσεις [1] και [2] για τα δύο υπόβαθρα επιφάνειας που χαρακτηρίζουν τους δύο μετεωρολογικούς σταθμούς. Επιπλέον γίνεται διερεύνηση κατά πόσο ο αεροδυναμικός (αδιαβατικός) όρος της εξίσωσης Penman-Monteith, διαφοροποιείται κάτω από την επίδραση των διαφορετικών χαρακτηριστικών των δύο επιφανειών.

¹ Η έκφραση της ακτινοβολίας R_a σε ισοδύναμο ύψους νερού (mm) αποδίδεται με την εισαγωγή της λανθάνουσας ενέργειας

εξάτμισης (λ) μέσω της σχέσης:

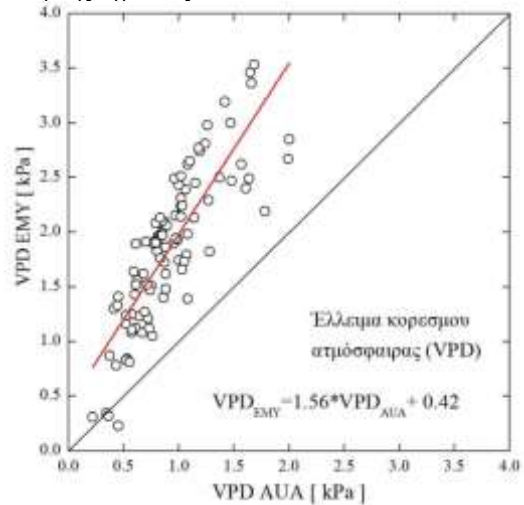
$1 \text{ mm / day} = 0.408 \text{ MJ/m}^2 \text{ day (at } 20^\circ \text{C)}$



Εικόνα 3. Συγκριτική απεικόνιση (EMY vs AUA) της (α) μεταβολής της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας και (β) της μέσης σχετικής υγρασίας από τις 26/05 έως και 01/09 για το έτος 2004.

Στην Εικ. 3α & 3β αποτυπώνεται η επίδραση της εδαφικής υγρασίας και της βλάστησης στις δύο βασικές παραμέτρους που χαρακτηρίζουν το μικροκλίμα μιας περιοχής (Θερμοκρασία και σχετική υγρασία). Τα μεγάλα ποσά λανθάνουσας ενέργειας που δαπανώνται για τη εξάτμιση ή/και διαπνοή μιας επιφάνειας που εξατμίζει με δυνητικό ρυθμό κατά ένα σημαντικό ποσοστό λαμβάνονται από την αισθητή θερμότητα της ατμόσφαιρας (αδιαβατική διαδικασία). Αυτή η φυσική διαδικασία είναι και η αιτία που διαμορφώνει τις συνθήκες που επικρατούν στο υπερκείμενο οριακό στρώμα. Στην αντίθετη περίπτωση η έλλειψη εδαφικής υγρασίας (περίπτωση γυμνού εδάφους, EMY) δημιουργεί ξερικές συνθήκες στην υπερκείμενη οριακή στρώση, με αποτέλεσμα η ενέργεια που δεν δαπανάται για εξάτμιση και διαπνοή να αποδίδεται ως επιπλέον θερμότητα με την εδαφική ροή G , στο υπερκείμενο στρώμα της ατμόσφαιρας. Αυτό διαφοροποιεί έντονα το θερμικό ισοζύγιο του 24ωρου επηρεάζοντας και το επόμενο διαδοχικά 24ωρο. Γίνεται ιδιαίτερα έντονο σε διαστήματα θερμών περιόδων και αποτυπώνεται στο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος DTR (Diurnal Temperature Range). Η μέση αύξηση της θερμοκρασίας των 4,3 °C και η ελάττωση της μέσης σχετικής υγρασίας κατά 20,2% που παρατηρήθηκε από την 25^η Μαΐου έως και την 1^η Σεπτεμβρίου (99 ημέρες) στον σταθμό της EMY σε σχέση με τον σταθμό του ΓΠΑ (AUA), οδηγεί σε τεράστια σφάλματα στον υπολογισμό της ET_0 με αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της ET_0 . Στην Εικ.4 διαπιστώνεται με χαρακτηριστικό τρόπο το "εικονικό" έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD) που διαμορφώνεται πάνω από την επιφάνεια του γυμνού εδάφους συγκριτικά με μια επιφάνεια βλάστησης υπό

πλήρη επάρκεια εδαφικής υγρασίας και η οποία διαπνέει με μέγιστο ρυθμό. Η σχέση απεικονίζει μια υποθετική ζήτηση της ατμόσφαιρας σε νερό, που φθάνει σχεδόν στο διπλάσιο σε σχέση με αυτή που απαιτείται από μια χαμηλή βλάστηση με επάρκεια εδαφικής υγρασίας.



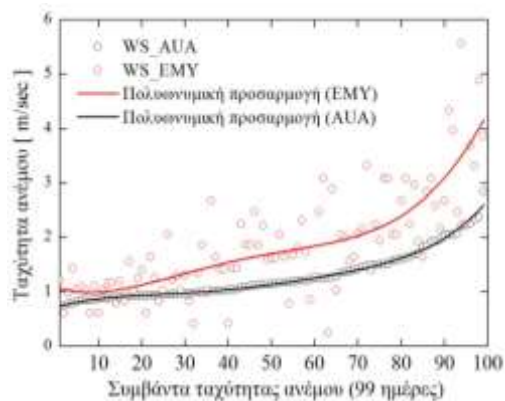
Εικόνα 4. Γραμμική παλινδρόμηση των ημερήσιων τιμών του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας στο σταθμό AUA σε σχέση με το σταθμό της EMY. ($R^2=0,70$)

Επίσης τα διαφορετικά αεροδυναμικά στοιχεία που συνθέτουν τις δύο επιφάνειες (ύψος τραχύτητας στη μεταφορά της ορμής, το διαφορετικό ύψος μηδενισμού της ταχύτητας), που εκφράζονται με τον όρο της αεροδυναμικής αντίστασης, διαφοροποιούν το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου, το οποίο λαμβάνεται τυπικά στα 2m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Σε αυτή την διαφοροποίηση του μέτρου της ταχύτητας, συμβάλει επίσης και η διαφορετική ζώνη επιρροής (fetch) της κάθε θέσης εγκατάστασης του σταθμού με τα περιβάλλοντα φυσικά και τεχνητά χαρακτηριστικά που την συνθέτουν (εμπόδια, απόσταση δένδρων, κτιρίων, κ.λπ.). Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επισημανθεί ότι στην εργασία αυτή δεν εξετάζονται τα τυχόν σφάλματα και το πρόερχονται από τα πρωτόκολλα μετρήσεων να έχουν μια προσθετική επίδραση στις λαμβανόμενες τιμές της ET_0 . Στην Εικ.5, παρουσιάζεται η διαφορά του μέτρου της μέσης ημερήσιας ταχύτητας του ανέμου (m/sec), ταξινομούμενη (αυξανόμενη) ως προς την τιμή της ταχύτητας του σταθμού AUA σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή του σταθμού EMY. Η συγκριτική αυτή παρουσίαση απεικονίζει τα αντίστοιχα γεγονότα ως μεγέθη για όλες τις ημερήσιες μέσες τιμές, ανεξαρτήτως της ημέρας που παρατηρήθηκαν.

Συνοπτικά στο πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι μέσες παρατηρούμενες τιμές των δύο θέσεων για όλη την θερινή περίοδο (25/05/04 - 01/09/04). Η διαφορά που προκύπτει στην ροή καθαρής ακτινοβολίας R_n οφείλεται στις διαφορετικές τιμές του albedo και της πραγματικής τάσης των υδρατμών που εισάγονται στις εμπειρικές εξισώσεις στην διαδικασία υπολογισμού της R_n από την μικρού

μήκους ολικής εισερχόμενης ακτινοβολίας R_s , (Allen et al., 1998):

Παράμετρος	AUA	EMY	Μονάδα
T_{avg}	20.27	24.53	[°C]
RH_{avg}	62.83	42.60	%]
U_2	1.28	1.85	[m/sec]
R_n	14.18	16.99	[MJ/m ² day]
VPD	0.92	1.86	[kPa]

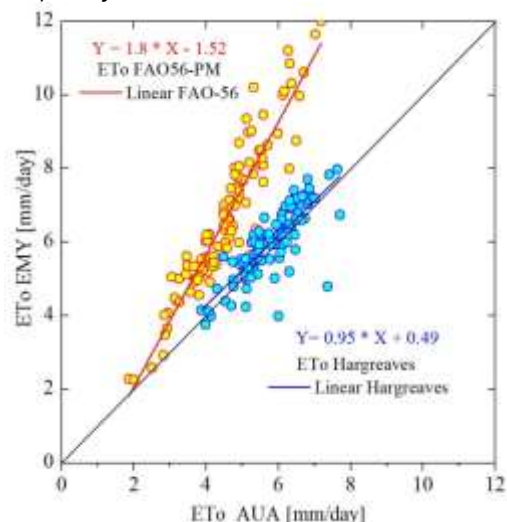


Εικόνα 5. Πολυωνυμική προσαρμογή των ταχυτήτων του ανέμου (ταξινομούμενων) στα δύο υπόβαθρα EMY και AUA.

3.2. Συγκριτική αξιολόγηση των τιμών ET_o

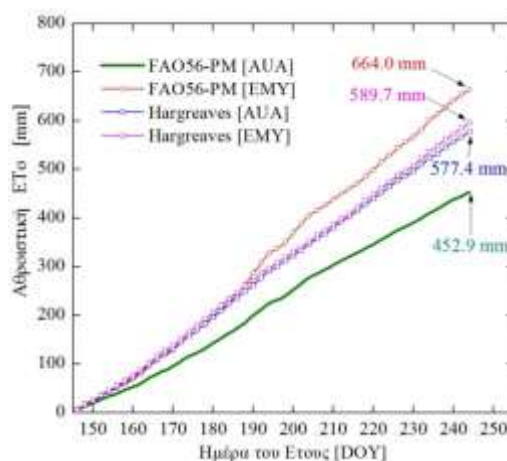
Η γεινίαση της πειραματικής θέσης AUA με ένα κλιματικό σταθμό της EMY που ανήκει στο παγκόσμιο δίκτυο WMO, καθώς οι επαρκείς μετρήσεις του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού AUA πάνω από χαμηλή αρδευόμενη βλάστηση έδωσε την ευκαιρία να διερευνηθεί η επίδραση του υποβάθρου στις εκτιμήσεις της ET_o σε ένα περιορισμένο χωρικά μικροκλιματικό καθεστώς. Με τις εξισώσεις [1] και [2] εκτιμήθηκαν οι ημερήσιες τιμές εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o σύμφωνα με τις προϋποθέσεις που ήδη έχουν συζητηθεί παραπάνω. Στην εικόνα 6, αποτυπώνεται καθαρά η υπερεκτίμηση των τιμών ET_o που λαμβάνονται πάνω από ένα ξηρό περιβάλλον χωρίς επάρκεια εδαφικής υγρασίας. Αυτή η αποτύπωση, διαπιστώνεται από την πρώτη γραμμική παλινδρόμηση (κόκκινη γραμμή τάσης) των τιμών ET_o που προέκυψαν από την χρήση της μέθοδο FAO56-PM, όπου παρουσιάζεται μια συστηματική υπερεκτίμηση (κλίση 1,8 με $R^2 = 0,88$) των τιμών που προέρχονται από δεδομένα της ξηρής επιφάνειας σε σχέση με εκείνες που λαμβάνονται από αρδευόμενη χαμηλή βλάστηση. Η τυπική εφαρμογή των συνιστώμενων μεθοδολογιών (Allen et al., 1998) δεν θα έδινε τιμές ρυθμού εξατμισοδιαπνοής που θα υπερέβαιναν τα 8,5 mm/day σε περιοχές με μέσα μεσογειακά γεωγραφικά πλάτη, ακόμα και κάτω από ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και ακτινοβολίας (Αλεξανδρής, 2003; Alexandris et al., 2006). Σε αντίθεση, η γραμμική συσχέτιση (μπλε γραμμή τάσης) που προκύπτει από τις αντίστοιχες εκτιμήσεις της ET_o με χρήση της μεθόδου Hargreaves, έδωσε μια πολύ καλή προσέγγιση μεταξύ των τιμών AUA και EMY, παρά την σχετικά μεγάλη παρατηρούμενη διασπορά

μεταξύ των εκτιμήσεων ($R^2 = 0,65$) από τις δύο επιφάνειες.



Εικόνα 6. Γραμμική συσχέτιση των εκτιμώμενων τιμών ET_o της πειραματικής θέσης AUA σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της EMY α) με την μέθοδο FAO56-PM ($R^2=0,88$) και β) με την μέθοδο Hargreaves ($R^2=0,65$).

Η κλίση 0,95 της γραμμής συσχέτισης δείχνει ότι η μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία ως ένας από τους δύο παράγοντες που εισάγονται στη μέθοδο (δηλαδή το ημερήσιο εύρος θερμοκρασιακής διακύμανσης) δεν είναι δυνατόν να αποτυπώσει την διαφορετική φύση των δύο επιφανειών διότι πιθανά ο ρυθμός αλλαγής της αισθητής θερμότητας στην υπερεκείμενη ατμόσφαιρα είναι πολύ χαμηλός από ημέρα σε ημέρα. Απότομες όμως αλλαγές στον δεύτερο παράγοντα (μέση ημερήσια θερμοκρασία) προκαλεί πιθανά την παρατηρούμενη διασπορά των εκτιμώμενων τιμών ET_o . Αυτό είναι εμφανές στις 3 ακραίες τιμές διασποράς (Εικ.6) σε σχέση με τις παρατηρούμενες μεγαλύτερες απότομες πτώσεις των ημερήσιων μέσων θερμοκρασιών της εικόνας 3α.



Εικόνα 7. Αθροιστική ET_o 25/05/2004 - 01/09/2004.

Στην εικόνα 7 εμφανίζεται η αθροιστική ET_o για όλη την περίοδο των 99 ημερών (25/5 -1/9) όπως εκτιμήθηκε από τις δύο μεθόδους FAO56-PM και Hargreaves και για τις δύο επιφάνειες.

Η ευαισθησία της πρώτης μεθόδου η οποία εκφράζει το ενεργειακό ισοζύγιο μιας επιφάνειας σε συνδυασμό με την αεροδυναμική μεθολογία δικαιολογεί την συνολική διαφορά των 211 mm ET_o μεταξύ των δύο επιφανειών για όλη συνολικά την αναφερόμενη περίοδο των 99 ημερών. Η μέθοδος Hargreaves στην ξηρή επιφάνεια (EMY) υπερεκτιμά κατά 139 mm σε σχέση με την FAO56-PM στην θέση AUA, ενώ δεν διαφοροποιείται σημαντικά από τις αντίστοιχες τιμές ET_o Hargreaves (AUA) που λαμβάνονται στο ίδιο υπόβαθρο (125 mm).

Στο ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι υπερεκτιμήσεις σε mm/day και το ποσοστό τους σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM ET_o (4,6 mm/day) στην θέση AUA για την συνολική περίοδο 21 Μαΐου έως και 1 Σεπτεμβρίου του 2004:

Θέση Μέθοδος	Μέση τιμή mm/day	Υπερεκτίμηση (+) mm	Υπερεκτίμηση (+) %
AUA/FAO56-PM	4.6	-	-
AUA/Hargreaves	5.8	1.3	27.5
EMY/FAO56-PM	6.7	2.1	46.6
EMY/Hargreaves	6.0	1.4	31.5

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και η εργασία των των Allen et al. (1998) αριθμεί πάνω από 9000 ετεροαναφορές σε διεθνή περιοδικά, ο αριθμός των επιστημόνων που επισημαίνουν τη σπουδαιότητα και τη σημασία της καλλιέργειας αναφοράς με επάρκεια νερού, είναι αρκετά περιορισμένος. Η εργασία αυτή επισημαίνει ως κύριο συμπέρασμα ότι η χρήση εκτιμήσεων της ET_o από μη τυποποιημένες επιφάνειες αναφοράς επαρκώς εφοδιαζόμενες με νερό μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση των υδατικών αναγκών που υπερβαίνει τα 2.5 χιλιάδες m³ νερού ανά εκτάριο για μια καλλιεργητική περίοδο 120 ημερών. Έχει δημιουργηθεί η ψευδής εντύπωση ότι η επάρκεια των παραμέτρων για την χρήση της συνιστώμενης μεθόδου FAO56-PM θα δώσει και ακριβείς εκτιμήσεις για τον προγραμματισμό άρδευσης. Οι εκτιμήσεις ET_o με την μέθοδο Hargreaves, ελαχιστοποιούν τα σφάλματα κατά 15%, στην περίπτωση που οι μετρήσεις δεν λαμβάνονται από σταθμό με τυποποιημένη καλλιέργεια αναφοράς. Επίσης θα πρέπει να επισημανθεί ότι υπερεκτιμήσεις της ET_o οδηγούν σε υπεράντληση αρδευτικού νερού και σπατάλη ηλεκτρικής ενέργειας, με συνέπεια την υποβάθμιση της ποιότητας των υπογείων υδάτων αλλά αντίστοιχα και την αύξηση κόστους παραγωγής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά την Διοίκηση και το επιστημονικό προσωπικό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, που με προθυμία χορήγησαν όλα τα απαραίτητα στοιχεία και υλικό, για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alexandris S., Kerkides P., Liakatas A. (2006). Daily reference evapotranspiration estimates by the

“Copais” approach. *Agricultural water Management*, Vol.82, Issue 3, 24 I, pp. 371-386.

Allen R.G., 1996. Assessing Integrity of Weather Data for Reference Evapotranspiration Estimation. *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 122, No. 2, pp. 97-106, Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 300 pp.

Allen, G.R., 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, Italy, 78-86.

Allen, R.G., W.O. Pruitt, J.L. Wright, T.A. Howell, F. Ventura, R. Snyder, D. Itenfisu, P. Steduto, J. Berengena, J.B. Yrisarry, M. Smith, L.S. Pereira, D. Raes, A. Perrier, I. Alves, I. Walter, and R. Elliott. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ET_o by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agric. Water Manage.* 81:1–22.

ASCE-EWRI, 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, VA 20191-4400, 173 pp.

Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. Paper No. 85-2517. American society of agricultural engineers. Chicago, IL.

Kashyap P.S., R.K. Panda, 2001. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. *Agricultural Water Management*, 50 (1):9-25

WMO, 2008. WMO Guide To Meteorological Instruments And Methods Of Observation. Part I, Chapter 2. 7th edition.

Yoder, R.E., T.W. Ley and R.L. Elliott. 2000. Measurement and reporting practices for automatic agricultural weather stations. *Proceedings of the 4th National Irrigation Symposium*, ASAE, St. Joseph, MI

Αλεξανδρής Σ., 2003. “Συγκριτική αξιολόγηση μεθόδων εξατμισοδιαπνοής κάτω από Ελληνικές συνθήκες”. Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Προύτσος Ν., Α. Λιακατάς, Α. Κοτρώζου και Σ. Αλεξανδρής, 2009. Μικρομετεωρολογικές συνθήκες και υδατοδιαθεσιμότητα για πατατοπαραγωγή στην Αρκαδία. Πρακτικά 6^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωργικής Μηχανικής, σελ. 115-122. Θεσσαλονίκη, 8-10/9/2009.