



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΚΑΙ
ΕΠΑΝΑΛΥΣΗΣ ERA5-LAND ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Μαριάννα Η. Γκαύρου

Επιβλέπων: Ε. Μπαλτάς, Καθηγητής ΕΜΠ

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΚΑΙ
ΕΠΑΝΑΛΥΣΗΣ ERA5-LAND ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Μαριάννα Η. Γκαύρου

Επιβλέπων: Ε. Μπαλτάς, Καθηγητής ΕΜΠ

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

Copyright © Μαριάννα Γκαύρου

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αναφέρεται επίσης πως τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ανήκουν στην εταιρία NEUROPUBLIC A.E. καθώς και η τεχνική περιγραφή του αγρομετεωρολογικού σταθμού GAIATron.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όσες και όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Μπαλτά, καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επιβλέποντα της παρούσας μελέτης, για την στήριξή του, τις συμβουλές του και τις παρατηρήσεις του που ήταν καίριες καθώς και στις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον φίλο και συμφοιτητή Νικόλα Γουργουλέτη για την καθοδήγηση και για τις πολύτιμες συμβουλές του, την κατανόηση, την άμεση ανταπόκριση και την άψογη συνεργασία καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Είναι επίσης χρέος μου να ευχαριστήσω την εταιρία μου, την NEUROPUBLIC A.E., για την ευγενική παραχώρηση των μετεωρολογικών δεδομένων, και πιο συγκεκριμένα τους συναδέλφους μου από τη Διεύθυνση Επιστήμης και Ανάλυσης Δεδομένων για την πολύτιμη βοήθεια τους.

Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου και φυσικά τους φίλους μου για την συμπαράσταση, τις συμβουλές και την πολύτιμη ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφεραν.

Περίληψη

Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0) είναι απαραίτητη για τη διαχείριση των υδατικών πόρων. Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία συγκρίνει και αξιολογεί την υπολογισμένη, τόσο από μετεωρολογικά δεδομένα επανάλυσης όσο και από επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_0 . Τα επίγεια δεδομένα προήλθαν από τον αγρομετεωρολογικό σταθμό GAIATRON της εταιρείας NEUROPUBLIC A.E. ενώ τα δεδομένα επανάλυσης (Reanalysis Data) από τον ERA5-Land. Χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα μετεωρολογικά δεδομένα υπολογίστηκε η ET_0 με τη μέθοδο FAO-56 Penman Monteith, αλλά και με τρεις ακόμη εμπειρικές μεθόδους, την Copais, την Valiantzas και την Hargreaves-Samani. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις μεταξύ των τιμών ET_0 από τα επίγεια δεδομένα και των τιμών ET_0 από τα δεδομένα του επανάλυσης. Ως βάση των συγκρίσεων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος FAO-56 PM με χρήση των επίγειων δεδομένων. Η αξιολόγηση των επιδόσεων της ET_0 πραγματοποιήθηκε σε τρεις διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας, με έντονο τον γεωργικό τομέα, την Κομοτηνή, την Λάρισα και τον Μαραθώνα. Σκοπός ήταν να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού της ET_0 . Τέλος, για την καλύτερη κατανόηση των μετεωρολογικών συστημάτων κρίθηκε αναγκαία η ανάλυση ευαισθησίας, προκειμένου να υποδείξει τη φυσική σημασία κάθε μετεωρολογικής παραμέτρου που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.

Abstract

The estimation Reference Evapotranspiration (ET_0) is essential for water resources management. The present research compares four different ET_0 estimators based on reanalysis data (ERA5-Land) and in-situ observations in three different cultivation sites in Greece, Marathonas, Larisa and Komotini. ET_0 based on FAO56-Penman Monteith is compared to ET_0 calculated from the empirical methods of Copais, Valiantzas and Hargreaves-Samani from both reanalysis and in-situ data. Daily and monthly bias of each method is calculated against the FAO56-PM method. ERA5-Land data is also compared to ground-truth observations. Additionally, a sensitivity analysis is conducted on each site for different cultivation periods. The present research finds that the use of ERA5-Land data underestimates ground-truth based ET_0 by 35% approximately, when using FAO56-PM method. Moreover, the use of the other examined methodologies show underestimation of ET_0 when calculated with ERA5-Land data. On the contrary, the use of Valiantzas and Copais methodologies with in-situ observations shows slight overestimation of ET_0 when compared to FAO56-PM. The sensitivity analysis resulted in solar radiation and relative humidity to be the most sensitive variables of the Copais and Valiantzas methodologies. Overall, the Hargreaves-Samani methodology was found to be the most efficient tool for the ET_0 estimation. At last the evaluation of the ERA5-Land data showed that only temperature inputs can be utilized with high levels of expected accuracy.

Extended Summary

Water resources management is one of the main challenges of the 21st century globally, as many regions of the world are unlikely to be able to cope with freshwater demand in the upcoming decades (Moore & Lobell, 2014). The agricultural sector, especially crop irrigation is one of the main and most important sectors of freshwater consumption. In particular, following the intensification of irrigation in southern Europe (Greece, Italy, Portugal, Cyprus and Spain) the percentage of drinking water abstraction has reached 80%, which makes it imperative to both reduce water wastage and increase irrigation efficiency, which can be achieved by a more accurate assessment of crop water needs (Kustas & Norman, 2009; L S Pereira et al., 1996). Therefore, the estimation of the Reference Evapotranspiration (ET_o) is a prerequisite for the effective planning of water resources and consequently for the effective design of irrigation systems (Iglesias & Garrote, 2015).

This research compares four different methods of ET_o estimation based on reanalysis data (ERA5-Land) and ground weather data from IoT (Internet of Things) agrometeorological stations in three different regions of Greece with intensive agricultural activity, Marathona, Larisa and Komotini. More specifically, ET_o based on FAO56-Penman Monteith method is compared with ET_o calculated by empirical methods of Copais, Valiatzas and Hargreaves-Samani from both reanalysis and in situ data. In addition, the ERA5L data are compared with the corresponding ground-based data. More specifically, the RMSE, the correlation coefficient and the slope α of the linear correlation were calculated for the methods. In addition, five (5) meteorological parameters, maximum, minimum and average air temperature (T_{max} , T_{min} & T_{avg}), average relative humidity (RH_{avg}) and solar radiation (R_s) were examined and compared based on the weather data source. For each one component, the R^2 coefficient and slope α were estimated from the linear correlation. Finally, a sensitivity analysis is conducted to capture the meteorological variables relationships and indicate their physical significance.

The empirical ET_o methods used in this research are Copais (Alexandris et al., 2006), Valiantzas (Valiantzas, 2013) radiation based and Hargreaves Samani (George H. Hargreaves & Zohrab A. Samani, 1985) temperature based are detailed below. The Penman-Monteith method is also mentioned, which is the most widely accepted method of ET_o calculation.

The Copais method (ET_o mm/day) is described by Equation (1) and by Equations (2) and (3).

$$ET_o = m_1 + m_2 C_2 + m_3 C_1 + m_4 C_1 C_2 \quad (1)$$

where $m_1 = 0,057$, $m_2 = 0,277$, $m_3 = 0,643$, $m_4 = 0,124$ and

$$C_1 = 0,6416 - 0,00784RH + 0,372R_s - 0,00264R_s RH \quad (2)$$

$$C_2 = -0,0033 + 0,00812T + 0,101R_s - 0,00584R_s T \quad (3)$$

where RH is the average relative humidity (%), R_s is the average solar incoming radiation ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$) and T is the average air temperature ($^{\circ}C$).

The formula used to apply the Valiatzas method is expressed by Equation (4), which does not require wind speed data.

$$ET_o \approx 0,0393R_s\sqrt{T + 9,5} - 0,19R_s^{0,6}\varphi^{0,15} + 0,078 (T + 20)\left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (4)$$

where R_s is the solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), T is the air temperature ($^{\circ}\text{C}$), RH is the mean relative humidity (%) and ϕ is the latitude in rad.

The Hargreaves (1975) equation, modified in 1985 for grass conditions, requires temperature measurements and is defined by Equation (5)

$$ET_o = 0,0023(T_{max} - T_{min})^{0,5}(T + 17,8) R_a \quad (5)$$

where T , T_{max} , T_{min} are the mean, maximum and minimum air temperature ($^{\circ}\text{C}$) respectively and R_a is the radiation at the outer boundary of the atmosphere (mm day^{-1}) estimated from the latitude and day of the year (DOY).

The FAO56-PM method, which gives reliable estimates only under specific conditions determined by the characteristics of the reference crop and the availability of sufficient soil moisture, is given by Equation (6).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad (6)$$

where R_n is the net radiative flux density of the crop surface ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), G is the soil heat flux density ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$), T is the average daily air temperature at a height of two meters ($^{\circ}\text{C}$), u_2 is the wind speed at the height of two metres (m sec^{-1}), e_s is the saturated water vapour tension (kPa), e_a is the actual water vapour tension (kPa), D is the slope of the saturated water vapour curve with air temperature ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). The daily ground heat flux density is assumed to be $G = 0$.

The study areas where the IoT stations GAIatron are installed, owned by NEUROPUBLIC, are located in Larissa, Komotini and Marathon. These three areas have a very intense agricultural activity. The location of the stations is shown in Figure 1.

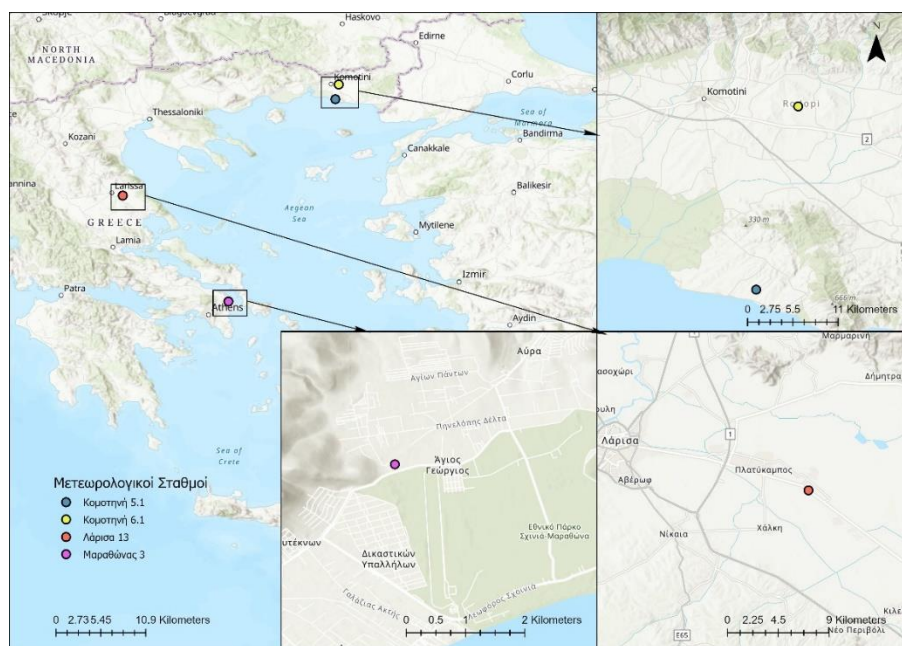


Figure 1. Illustration of the locations of GAIatron agrometeorological stations in Greece

The Thessaly plain was chosen as one of the tree case studies due to its importance for the Greek agriculture and economy. It is located in central Greece, in the basin of Pinios River, the largest river basin in Greece with an area of 10700 km², with an average annual rainfall of 779 mm and an average annual runoff of 3500 hm³. Thessaly plain is an area with intensive agricultural activity, where the estimation of evapotranspiration is crucial for water resources management. In the region of Thrace the main water use is irrigation. Agriculture uses 28% of the total area (over than 3000 km²), of which 44% is irrigated. The vast majority of agricultural land is arable (93.7%). Regarding the plain of Marathonas, it is also characterized by intense agricultural activity, as well as by urban development, mainly in recent years. The main part of the plain is covered by crops, with a cultivated area of 17 km².

The ground weather data come from 4 IoT stations of NEUROPUBLIC S.A. located in the abovementioned sites. Hourly data, are provided by these stations and used to estimate the daily ET_o. The data temporal availability does not constitute a full calendar year in any site. The IoT stations are often removed from the field after the end of each cultivation period. The present research employs the advanced global reanalysis data in Europe, specifically optimized for surface applications, the ERA5-Land (ERA5L), which is freely available from the Copernicus Service. ERA5-Land is produced globally with an intrinsic horizontal resolution of 9 km by replicating the land component of the ERA5 climate reanalysis from 1981 to 2-3 months before present. The atmospheric forcing in ERA5-Land is provided by the ERA5 land fields of atmospheric variables. The ERA5 air temperature, air humidity and pressure are corrected to account for the elevation difference between the forcing grid and the higher resolution grid ERA5-Land, according to the so-called lapse rate correction of the lapse rate of leaching (Munoz Sabater, 2019).

The comparison of the ET_o estimations of the three empirical methods is conducted on daily time step. When compared to the selected reference method using the ground-weather data, the Valiatzas method has the smallest percentile difference, the smallest RMSE error, as well as the highest correlation index, compared to the reference evapotranspiration FAO56-PM.

The calculations involving the reanalysis data for the same time period and for the three different sites show significant differences, compared to both reference and empirical relationships with in-situ data. In particular, all methods using reanalysis data underestimate ET_o, compared to the reference method FAO56-PM. The Hargreaves – Samani method proves to be the most accurate, showing the smallest underestimation of cumulative evapotranspiration per season compared to the reference ET_o, which is estimated on average at 26.72%.

Subsequently, by comparing the ET_o estimations of all methods with each other, based on the input data (ground-based and ERA5L), it is found that the Hargreaves – Samani method has the highest correlation to the other three methods, as well as the lowest RMSE (0.77 in average). Also, considering the linear slope α (0.84 in average), the same method shows the smallest differentiation between the two data inputs (Table 1).

Table 1. Statistical indicators for the evaluation of the Hargreaves - Samani method in relation to the input data

Hargreaves -Samani	Larisa 2019	Larisa 2020	Larisa 2021	Komotini 5.1 2020	Komotini 6.1 2020	Marathon as 2021	Average
RMSE	0.86	0.96	1.16	0.56	0.64	0.44	0.77
R²	0.97	0.96	0.97	0.94	0.93	0.93	0.95
Correlation	98.40%	98.08%	97.36%	96.91%	96.80%	96.54%	97.35%
a (y=ax)	0.82	0.80	0.81	1.08	0.93	0.59	0.84

Moreover, the analysis on the match between ground-based and reanalysis ERA5L meteorological data shows satisfactory concurrency between reanalysis data and in-situ based data. The only variable that shows weaker correlation is the incoming solar radiation, R_s . The temperature correlations (T_{max} , T_{min} and T_{avg}) are high (Table 2). The other variables, R_s and RH_{avg} , show relatively good correlation.

Table 2. Average values of the statistical indicators as obtained from analysis between ground-based and reanalysis ERA5L meteorological data

Average Values					
	$T_{air_{max}}$ (°C)	$T_{air_{min}}$ (°C)	$T_{air_{avg}}$ (°C)	RH (%)	R_s (MJ/m ² /day)
a (y=ax)	0.96	1.14	1.04	0.95	0.47
R²	0.93	0.79	0.95	0.61	0.74

The sensitivity analysis concludes that the reference evapotranspiration by FAO56-PM is more sensitive to wind speed. This variable and regardless of dry or spring season does not affect the Hargreaves - Samani, Copais and Valiatzas approaches. The average relative humidity variable is the only that in both seasons has a negative effect on the values of ET_o by Copais & Valiatzas. During the spring season in regions Larissa and Marathonas, the effect of RH_{avg} on FAO56-PM and Hargreaves-Samani ET_o values is negligible. In contrast, during the dry season in sites Larissa and Komotini, FAO56-PM is slightly positively influenced by the RH_{avg} variable. Of all the variables studied, it appears that solar radiation is the one that has the greatest effect on ET_o in all regions and for all seasons. More specifically, the ET_o by Copais is the one that shows the largest variation, followed by the Valiatzas method with a small difference. Mean temperature presents low influence on ET_o values regardless of the period and study area.

In conclusion, this research shows that the Hargreaves – Samani method can be an efficient tool for estimating ET_o with reanalysis data. This is due to the good match of the Hargreaves method results with ground-based and reanalysis data as it was demonstrated that the solar irradiance variable is not used. In general, the Hargreaves - Samani method is quite popular and widely used in the scientific community due to its minimum requirements on meteorological data.

In relation to the data and meteorological variables studied by their source (ground-based and reanalysis data), it appears that the ERA5-Land reanalysis data can only partially replace the ground-based data required for the calculation of reference evapotranspiration. Solar radiation shows the weakest correlation, followed by relative humidity. In contrast, temperature values show high correlation compared to ground data. It can be argued that temperature values (T_{min} , T_{max} & T_{avg}) can replace terrestrial data.

Finally, a further and in-depth research using larger time series of ground data and in different regions of Greece with different climatic conditions is proposed, in order to obtain more accurate approximations of ET_o . Additionally, such a task, could further evaluate empirical methods of ET_o calculation. A better and more accurate overview of the ERA5-Land reanalysis data and their divergence from in-situ data could provide correction approaches in order to minimize the need of in-situ data.

Selected Reference

- Alexandris, S., Kerkides, P., & Liakatas, A. (2006). Daily reference evapotranspiration estimates by the “ Copais ” approach. 82, 371–386. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.08.001>
- George H. Hargreaves, & Zohrab A. Samani. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Iglesias, A., & Garrote, L. (2015). Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. Agricultural Water Management, 155, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (2009). Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. 6667. <https://doi.org/10.1080/02626669609491522>
- Moore, F. C., & Lobell, D. B. (2014). *Adaptation potential of European agriculture in response to climate change*. May, 1–5. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2228>
- Pereira, L S, Perrier, A., Allen, R. G., & Alves, I. (1996). Evapotranspiration: Review of concepts and future trends. January.
- Valiantzas, J. D. (2013). Simple ET_o Forms of Penman ' s Equation without Wind and / or Humidity Data . II : Comparisons with Reduced Set-FAO and Other Methodologies. January, 9–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000502](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000502).

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	7
Abstract	7
Extended Summary	8
1. Εισαγωγή	22
1.1. Ο Υδρολογικός Κύκλος	24
1.2. Κλιματική Αλλαγή και Υδατικοί Πόροι	25
2. Η έννοια της εξατμισοδιαπνοής	27
2.1. Εξάτμιση	27
2.2. Διαπνοή	28
2.3. Εξατμισοδιαπνοή	28
2.3.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή	30
2.3.2. Μετεωρολογικοί παράγοντες που καθορίζουν την ΕΤ.....	32
2.4. Εμπειρικές Μέθοδοι Υπολογισμού Εξατμισοδιαπνοής.....	34
2.4.1. Copais (Alexandris et al., 2006).....	35
2.4.2. Valiantzas (Valiantzas, 2013).....	35
2.4.3. Hargreaves - Samani (George H. Hargreaves & Zohrab A. Samani, 1985).....	35
2.4.4. FAO – 56 Penman – Monteith (Allen et al., 1998)	36
3. Περιοχές Μελέτης και Μετεωρολογικά Δεδομένα	37
3.1. Περιοχές Μελέτης.....	37
3.1.1. Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας - EL08	37
3.1.2. Υδατικό Διαμέρισμα Θράκης – EL12.....	40
3.1.3. Υδατικό διαμέρισμα Αττικής – EL06	42
3.2. Μετεωρολογικά δεδομένα	44
3.2.1. Επίγεια Μετεωρολογικά δεδομένα	45
3.2.2. ERA5- Land - Μετεωρολογικά Δεδομένα Επανάλυσης	50
4. Μεθοδολογία	54
4.1. Επεξεργασία και εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	54
4.2. Ανάλυση Ευαισθησίας	57
5. Αποτελέσματα.....	59
5.1. Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων ΕΤ _ο με FAO56-PM – ERAL & GAIAttron	59
5.2. Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων ΕΤ _ο – ERAL & GAIAttron.....	73
5.3. Αποτελέσματα Ανάλυση Ευαισθησίας	79
5.3.1. Αποτελέσματα Ξηρής Περιόδου για τις περιοχές της Λάρισας και Κομοτηνής....	80

5.3.2. Αποτελέσματα Εαρινής Περιόδου για τις περιοχές της Λάρισας και Μαραθώνα	84
6. Συμπεράσματα – Συζήτηση.....	89
Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	91
Παράρτημα Α	94
Λάρισα 2019.....	94
Λάρισα 2020.....	97
Λάρισα 2021.....	101
Κομοτηνή 5.1 2020.....	104
Κομοτηνή 6.1 2020.....	107
Μαραθώνας 2021	110

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Ο παγκόσμιος κύκλος του νερού, με τις ροές σε $10^{12} \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ μετά από το U.S. University Corporation for Atmospheric Research, https://spark.ucar.edu/longcontent/water-cycle, with updates from Durack et al. (2012) . Γραφική απεικόνιση προσαρμοσμένη από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, http://www.srh.noaa.gov/jetstream/index.htm	25
Εικόνα 2. Σχηματική απεικόνιση απλού στοματικού φύλλου ΠΗΓΗ: Διδακτορική Διατριβή Σ. Αλεξανδρή 2003	28
Εικόνα 3. Γραφική απεικόνιση της συμμετοχής εξάτμισης και διαπνοής σε μια τυπική καλλιεργητική περίοδο. ΠΗΓΗ: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Τροποποιημένη	29
Εικόνα 4. Απεικόνιση της επίδρασης του ανέμου στην εξατμισοδιαπνοή σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες ΠΗΓΗ: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Τροποποιημένο	34
Εικόνα 5. Λεκάνη Απορροής Ποταμού, Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας ΠΗΓΗ: 1 ^η Αναθεώρηση ΣΔΛΑΠ ΥΔ Θεσσαλίας, 2017).....	37
Εικόνα 6. Χρήσεις γης ΥΔ Θεσσαλίας. ΠΗΓΗ: 1 ^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας, 2017).....	39
Εικόνα 7. Υδατικό Διαμέρισμα Θράκης και οι λεκάνες απορροής του. (ΠΗΓΗ: 1 ^η Αναθεώρηση του σχεδίου διαχείρισης λεκανών απορροή ποταμών του ΥΔ Θράκης EL12)	41
Εικόνα 8. Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής [ΠΗΓΗ: 1 ^η Αναθεώρηση του σχεδίου διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών του ΥΔ Αττικής EL06).....	42
Εικόνα 9. Χρήσης γης στο Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής. [ΠΗΓΗ: 1 ^η Αναθεώρηση του σχεδίου διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών του ΥΔ Αττικής EL06).....	43
Εικόνα 10. Απεικόνιση των θέσεων των αγρομετεωρολογικών σταθμών GAIatron στον Ελλαδικό χώρο.	46
Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση των επιμέρους στοιχείων του σταθμού.	50
Εικόνα 12. Απεικόνιση της μέσης θερμοκρασίας του αέρα στα 2m από τον ERA5-Land τον Φεβρουάριο του 2019. ΠΗΓΗ: Copernicus Products, https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.e2161bac?tab=overview)	51
Εικόνα 13. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2019) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	60
Εικόνα 14. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2019) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάλυσης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	60
Εικόνα 15 Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	62
Εικόνα 16 Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάλυσης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	62
Εικόνα 17 Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2021) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	64

Εικόνα 18 Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάλυσης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	64
Εικόνα 19. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	66
Εικόνα 20. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάλυσης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	66
Εικόνα 21. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Κομοτηνής 6.1 (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	68
Εικόνα 22. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάλυσης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	68
Εικόνα 23. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή του Μαραθώνα (2021) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	70
Εικόνα 24. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή του Μαραθώνα (2021) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάλυσης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.	70
Εικόνα 25. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογικής παράμετρο T_{avg} για την ξηρή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Κομοτηνής.	81
Εικόνα 26. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογικής παράμετρο R_s για την ξηρή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Κομοτηνής.	82
Εικόνα 27. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογικής παράμετρο RH_{avg} για την ξηρή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Κομοτηνής.	83
Εικόνα 28. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογικής παράμετρο U_{avg} για την ξηρή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Κομοτηνής.	84
Εικόνα 29. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογικής παράμετρο T_{avg} για την εαρινή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Μαραθώνα.	85
Εικόνα 30. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογικής παράμετρο R_s για την εαρινή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Μαραθώνα.	86
Εικόνα 31. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογικής παράμετρο RH_{avg} για την εαρινή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Μαραθώνα.	87
Εικόνα 32. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογικής παράμετρο U_{avg} για την εαρινή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Μαραθώνα.	88
Εικόνα A-1. Λάρισα 2019 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	94
Εικόνα A-2. Λάρισα 2019 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	94
Εικόνα A-3. Λάρισα 2019 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	95
Εικόνα A-4. Λάρισα 2019 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	95

Εικόνα A-5. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{max}$ ανά πηγή δεδομένων.	95
Εικόνα A-6. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{mix}$ ανά πηγή δεδομένων.	96
Εικόνα A-7. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{avg}$ ανά πηγή δεδομένων.	96
Εικόνα A-8. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου RH_{avg} ανά πηγή δεδομένων.	96
Εικόνα A-9. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου R_s ανά πηγή δεδομένων.	97
Εικόνα A-10. Λάρισα 2020 – Corais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	97
Εικόνα A-11. Λάρισα 2020 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	98
Εικόνα A-12. Λάρισα 2020 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	98
Εικόνα A-13. Λάρισα 2020 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	98
Εικόνα A-14. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{max}$ ανά πηγή δεδομένων.	99
Εικόνα A-15. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{min}$ ανά πηγή δεδομένων.	99
Εικόνα A-16. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{avg}$ ανά πηγή δεδομένων.	99
Εικόνα A-17. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου RH_{avg} ανά πηγή δεδομένων.	100
Εικόνα A-18. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου R_s ανά πηγή δεδομένων.	100
Εικόνα A-19. Λάρισα 2021 – Corais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	101
Εικόνα A-20. Λάρισα 2021 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	101
Εικόνα A-21. Λάρισα 2021 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	102
Εικόνα A-22. Λάρισα 2021 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	102
Εικόνα A-23. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{max}$ ανά πηγή δεδομένων.	102
Εικόνα A-24. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{mix}$ ανά πηγή δεδομένων.	102
Εικόνα A-25. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{avg}$ ανά πηγή δεδομένων.	103
Εικόνα A-26. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου RH_{avg} ανά πηγή δεδομένων.	103

Εικόνα A-27. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου R_s ανά πηγή δεδομένων.	103
Εικόνα A-28. Κομοτηνή 5.1 2020 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	104
Εικόνα A-29. Κομοτηνή 5.1 2020 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	104
Εικόνα A-30. Κομοτηνή 5.1 2020 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	105
Εικόνα A-31. Κομοτηνή 5.1 2020 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	105
Εικόνα A-32. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{man}}$ ανά πηγή δεδομένων.	105
Εικόνα A-33. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{min}}$ ανά πηγή δεδομένων.	105
Εικόνα A-34. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{avg}}$ ανά πηγή δεδομένων.	106
Εικόνα A-35. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου RH_{avg} ανά πηγή δεδομένων.	106
Εικόνα A-36. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου R_s ανά πηγή δεδομένων.	106
Εικόνα A-37. Κομοτηνή 6.1 2020 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	107
Εικόνα A-38. Κομοτηνή 6.1 2020 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	107
Εικόνα A-39. Κομοτηνή 6.1 2020 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	108
Εικόνα A-40. Κομοτηνή 6.1 2020 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	108
Εικόνα A-41. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{man}}$ ανά πηγή δεδομένων.	108
Εικόνα A-42. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{min}}$ ανά πηγή δεδομένων.	108
Εικόνα A-43. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{avg}}$ ανά πηγή δεδομένων.	109
Εικόνα A-44. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου RH_{avg} ανά πηγή δεδομένων.	109
Εικόνα A-45. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου R_s ανά πηγή δεδομένων.	109
Εικόνα A-46. Μαραθώνα 2021 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	110
Εικόνα A-47. Μαραθώνα 2021 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	110
Εικόνα A-48. Μαραθώνα 2021 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	111

Εικόνα A-49. Μαραθώνας 2021 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.	111
Εικόνα A-50. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{max}$ ανά πηγή δεδομένων	111
Εικόνα A-51. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{min}$ ανά πηγή δεδομένων	111
Εικόνα A-52. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{avg}$ ανά πηγή δεδομένων	112
Εικόνα A-53. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Rh_{avg} ανά πηγή δεδομένων	112
Εικόνα A-54. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Rs ανά πηγή δεδομένων.	112

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης στο ΥΔ Θεσσαλίας. ΠΗΓΗ: (1 ^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας, ΟΠΕΚΕΠΕ 2015)	38
Πίνακας 2. Κατανομή ζήτησης ανά χρήση ύδατος ΥΔ Θεσσαλίας (Πηγή: 1 ^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας).....	39
Πίνακας 3. Λεκάνη Απορροής Ποταμού ΥΔ Θράκης, ΛΑΠ Κομοτηνής (ΠΗΓΗ: 1 ^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θράκης (EL12).....	40
Πίνακας 4 Έκταση και ποσοστό χρήσεων γης και τα έτη 1880, 1988 και 2000 (Πηγή: Ξανθάκης και Ξανθόπουλος, 2007)	44
Πίνακας 5. Μετεωρολογικοί σταθμοί GAIATron και οι αντίστοιχες χρονικές περίοδοι που χρησιμοποιήθηκαν.....	44
Πίνακας 6. Οι σταθμοί GAIATron που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ET _o και τα διάφορα χαρακτηριστικά στοιχεία τους.....	45
Πίνακας 7. Περιγραφή των τυπικών αισθητήρων του σταθμού GAIATron soil & Atmo Station.	48
Πίνακας 8. Τιμές ET _o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ER5L) για την περιοχή της Λάρισας για το έτος 2019	59
Πίνακας 9. Τιμές ET _o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ER5L) για την περιοχή της Λάρισας για το έτος 2020	61
Πίνακας 10. Τιμές ET _o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ER5L) για την περιοχή της Λάρισας για το έτος 2021	63
Πίνακας 11. Τιμές ET _o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ER5L) για την περιοχή της Κομοτηνής 5.1 για το έτος 2020	65
Πίνακας 12. Τιμές ET _o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ER5L) για την περιοχή της Κομοτηνής 6.1 για το έτος 2020	67
Πίνακας 13. Τιμές ET _o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ER5L) για την περιοχή του Μαραθώνα για το έτος 2021.	69
Πίνακας 14. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων Ποσοστιαία διαφοράς, δείκτη RMSE και του Συντελεστή Συσχέτισης για όλες τις εμπειρικές μεθόδους σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM, κάνοντας χρήση επίγειων δεδομένων (GAIATron).	72
Πίνακας 15. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων Ποσοστιαία διαφοράς, δείκτη RMSE και του Συντελεστή Συσχέτισης για όλες τις εμπειρικές μεθόδους σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM, κάνοντας χρήση δεδομένων επανάλυσης (ERA5L).....	72
Πίνακας 16. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET _o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Λάρισας (2019).....	73
Πίνακας 17. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Λάρισα 2019	74
Πίνακας 18. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET _o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Λάρισας (2020).....	74
Πίνακας 19. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Λάρισα 2020	75

Πίνακας 20. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET _o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Λάρισας (2020).....	75
Πίνακας 21. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Λάρισα 2021	76
Πίνακας 22. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET _o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020).....	76
Πίνακας 23. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Κομοτηνή 5.1 2020	77
Πίνακας 24. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET _o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Κομοτηνής 6.1 (2020).....	77
Πίνακας 25. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Κομοτηνή 6.1 2020	78
Πίνακας 26. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET _o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020).....	78
Πίνακας 27. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Μαραθώνας 2021	79
Πίνακας 28. . Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες την μεθόδους υπολογισμού Hargreaves – Samani της ET _o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων, για όλες τις περιοχές και τα έτη μελέτης	79
Πίνακας 29. Μέσες τιμές όπως αυτές προκύπτουν από την ανάλυση σχετικά με την ταύτιση των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων	79

1. Εισαγωγή

Η διαχείριση των υδατικών πόρων αποτελεί μία από τις βασικότερες προκλήσεις του 21^{ου} αιώνα παγκοσμίως, καθώς πολλές περιοχές του κόσμου είναι πιθανό να μην μπορούν να ανταπεξέλθουν στη ζήτηση γλυκού νερού τις επόμενες δεκαετίες (Moore & Lobell, 2014). Ο τομέας της γεωργίας και κυρίως η άρδευση των καλλιεργειών, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πηγές κατανάλωσης νερού, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 70%, της παγκόσμιας απόληψης νερού (Siebert, 2007). Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, στην άρδευση αντιστοιχεί περίπου το 24% του συνολικά καταναλισκόμενου όγκου νερού. Ωστόσο, η εντατική εφαρμογή αρδεύσεων στη νότια Ευρώπη (Ελλάδα, Ιταλία, Πορτογαλία, Κύπρος, Ισπανία) αυξάνει το ποσοστό αυτό στο 80%, καθιστώντας επιτακτική, τόσο την ανάγκη περιορισμού της σπατάλης του 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 & Norman, 2009; L S Pereira et al., 1996).

Η εκτίμηση της χρήσης του αρδευτικού νερού είναι επομένως θεμελιώδης για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό της κατανομής των υδατικών πόρων καθώς για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό των αρδευτικών συστημάτων (Iglesias & Garrote, 2015).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά, έχει προγραμματίσει πρόσθετες επενδύσεις μόνο για τις αρδευτικές υποδομές που προσφέρουν δυνητική εξοικονόμηση νερού τουλάχιστον μεταξύ 5% και 25%, η οποία θα πρέπει να επαληθεύεται με την εφαρμογή αξιόπιστων συστημάτων λογιστικής καταγραφής της χρήσης του αρδευτικού νερού (Parliament et al., 2020).

Η ποσοτική αξιολόγηση της χρήσης του αρδευτικού νερού βασίζεται κυρίως στη μοντελοποίηση του ισοζυγίου καλλιεργειών – αρδευτικού νερού (Allen, 2000; Consoli & Vanella, 2014; Calera et al., 2017; Gonzalez-dugo et al., 2009). Η εξατμισοδιαπνοή είναι η βασική μεταβλητή του υδατικού ισοζυγίου των καλλιεργειών, ιδίως στις περιοχές όπου η συνεισφορά των βροχοπτώσεων και των υπόγειων υδάτων είναι αμελητέα κατά την αρδευτική περίοδο (Luis S Pereira et al., 2012; Luis Santos Pereira, 2017). Η εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών εκτιμάται συνήθως σύμφωνα με τη διαδικασία FAO-56 (Allen et al., 1998), ως το γινόμενο ενός συντελεστή καλλιέργειας που αντιπροσωπεύει την κατάσταση της καλλιέργειας και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς του γρασιδιού (ET₀) που αντιπροσωπεύει την εξατμισοδιαπνοή της ατμόσφαιρας. Η βέλτιστη μέθοδος για την εκτίμηση της ET₀ είναι η εξίσωση Penman-Monteith σύμφωνα με τη διατύπωση FAO-56, υπό την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμο ένα πλήρες σύνολο μετεωρολογικών δεδομένων, συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας του αέρα, της ταχύτητας του ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας και της σχετικής υγρασίας.

Οι καλά συντηρημένοι και πλήρως εξοπλισμένοι επίγειοι μετεωρολογικοί σταθμοί είναι γενικά σπάνιοι, ακόμη σε αναπτυσσόμενες χώρες. Οι χρονοσειρές των μετεωρολογικών δεδομένων που συλλέγονται και είναι διαθέσιμα συχνά παρουσιάζουν κενά καθώς δεν υπόκεινται σε διαδικασίες ελέγχου και “καθαρίσματος” (Battisti, 2018). Η πρόσβαση στα δεδομένα αυτά είναι πολλές φορές δύσκολη. Πολλές δημόσιες ή ιδιωτικές υπηρεσίες που τα διαχειρίζονται, τα διαθέτουν στους τελικούς χρήστες ύστερα από πολύπλοκες διοικητικές διαδικασίες. Επίσης πολλές φορές για να αποκτήσεις τέτοιου είδους δεδομένα χρειάζεται να πληρώσεις, ακόμη και αν είναι για εκπαιδευτική χρήση (A. Pelosi & Chirico, 2021).

Στις περιοχές επομένως όπου υπάρχει ένα σύνολο μετεωρολογικών δεδομένων εδάφους για μια ολόκληρη περίοδο αναφοράς, μπορεί να προκύψει μια περιφερειακή εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o) με χωρική παρεμβολή (Lewis et al., 2014; Strong et al., 2017). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις χωρικές παρεμβολές πολλές φορές υπόκεινται σε σφάλματα μέτρησης, όσο και σε άλλες ασάφειες, όπως η αβεβαιότητα στη χωρική δομή του πεδίου παρεμβολής ή ακόμη και στην μη αντιπροσωπευτικότητα της θέσης του επίγειου σταθμού (Chirico et al., 2010).

Για εκτίμηση της ET_o έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούν μειωμένο σύνολο μεταβλητών. Κάνουν χρήση δεδομένων τα οποία είναι εύκολα διαθέσιμα. Οι πιο αξιόπιστες μέθοδοι εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς είναι όσες διαθέτουν ισχυρό θεωρητικό φυσικό υπόβαθρο, έστω και αν διαθέτουν κάποιο βαθμό εμπειρισμού, καθώς μπορούν να παρέχουν ικανοποιητικές εκτιμήσεις της ET_o, σε διαφορετικά κλιματικά καθεστώτα. Μια τέτοια μέθοδος είναι η FAO-56 PM (Allen et al., 1998) η οποία είναι ευρέως αποδεκτή από την επιστημονική κοινότητα.

Στην Ελλάδα, η έλλειψη δεδομένων καλής ποιότητας επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων δυσκολεύει την εκτίμηση των ημερήσιων αναγκών των καλλιεργειών σε νερό (Alexandris et al., 2016). Η απαίτηση της ύπαρξης καλλιέργειας αναφοράς, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, ως υπόβαθρο των μετεωρολογικών σταθμών, αποτελεί αναγκασία προϋπόθεση για την εκτίμηση της ET_o με την εξίσωση FAO-56 PM, καθιστώντας το πρόβλημα της έλλειψης ορθών, ποιοτικών δεδομένων ακόμα πιο μεγάλο. Η έλλειψη επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων θα μπορούσε να καλυφθεί κάνοντας χρήση δορυφορικών δεδομένων (Allen et al., 2007b; Mu et al., 2007), τα οποία και καλύπτουν μεγαλύτερες επιφάνειες.

Οι κλιματικές επαναλύσεις συνδυάζουν παρατηρήσεις του παρελθόντος με μοντέλα για τη δημιουργία συνεχόμενων χρονοσειρών πολλαπλών κλιματικών μεταβλητών. Οι επαναλύσεις συγκαταλέγονται μεταξύ των πλέον χρησιμοποιημένων συνόλων δεδομένων στις γεωφυσικές επιστήμες. Παρέχουν μια ολοκληρωμένη περιγραφή του παρατηρούμενου κλίματος, όπως αυτό έχει διαμορφωθεί τις τελευταίες δεκαετίες.

Τα δεδομένα επανάλυσης αποτελούν αποτελεσματική πηγή δεδομένων για μελέτες σχεδιασμού και προγραμματισμού που εφαρμόζονται στη διαχείριση του αρδευτικού νερού για δύο βασικούς λόγους (Anna Pelosi et al., 2020): i) οι μετεωρολογικοί οργανισμοί διανέμουν δεδομένα reanalysis τα οποία είναι ελεύθερα διαθέσιμα σε ειδικές διαδικτυακές πλατφόρμες, σε συνεπή χωρική και χρονική μορφή- ii) οι τελικοί χρήστες μπορούν εύκολα να επεξεργάζονται δεδομένα και για περιοχές που εκτείνονται πέρα από διοικητικά όρια, αποφεύγοντας έτσι το βάρος της συλλογής και ομογενοποίησης δεδομένων μετεωρολογικών σταθμών από διαφορετικούς παρόχους δεδομένων.

Πολλές είναι οι μελέτες που έχουν γίνει και έχουν αξιολογήσει την απόδοση της πρόβλεψης της ET_o με τη χρήση δεδομένων επανάλυσης (reanalysis data). Το 2019, στο πλαίσιο της υπηρεσίας Copernicus Climate Change Service, το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) κυκλοφόρησε την επανάληψη του ERA5 και του ERA5-Land, η οποία προκύπτει από την αναπαραγωγή της χερσαίας συνιστώσας της κλιματικής επανάλυσης του ERA5 με οριζόντια διακριτική ικανότητα 9 χλμ. Οι Pelosi et al., (2020) έδειξαν ότι η ακρίβεια της ημερήσιας ET_o που προβλέπεται με τον ERA5-Land είναι συγκρίσιμη με εκείνη που προβλέπεται με χωρική παρεμβολή των επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων, αλλά

επισήμαναν επίσης ότι η εισερχόμενη βραχύβια ηλιακή ακτινοβολία που ανακατασκευάζεται από το ERA5-Land είναι η πιο επιρρεπής σε σφάλματα μεταξύ των μετεωρολογικών μεταβλητών που εμπλέκονται στην εκτίμηση της ET_o.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αξιολογηθεί η χρήση δεδομένων από τον ERA5-Land για την εκτίμηση της ημερήσιας ET_o με FAO-56 PM, καθώς και η και η σύγκριση των εκτιμώμενων τιμών της ET_o από δεδομένα αγρομετεωρολογικών σταθμών GAIATron της εταιρείας NEUROPUBLIC.

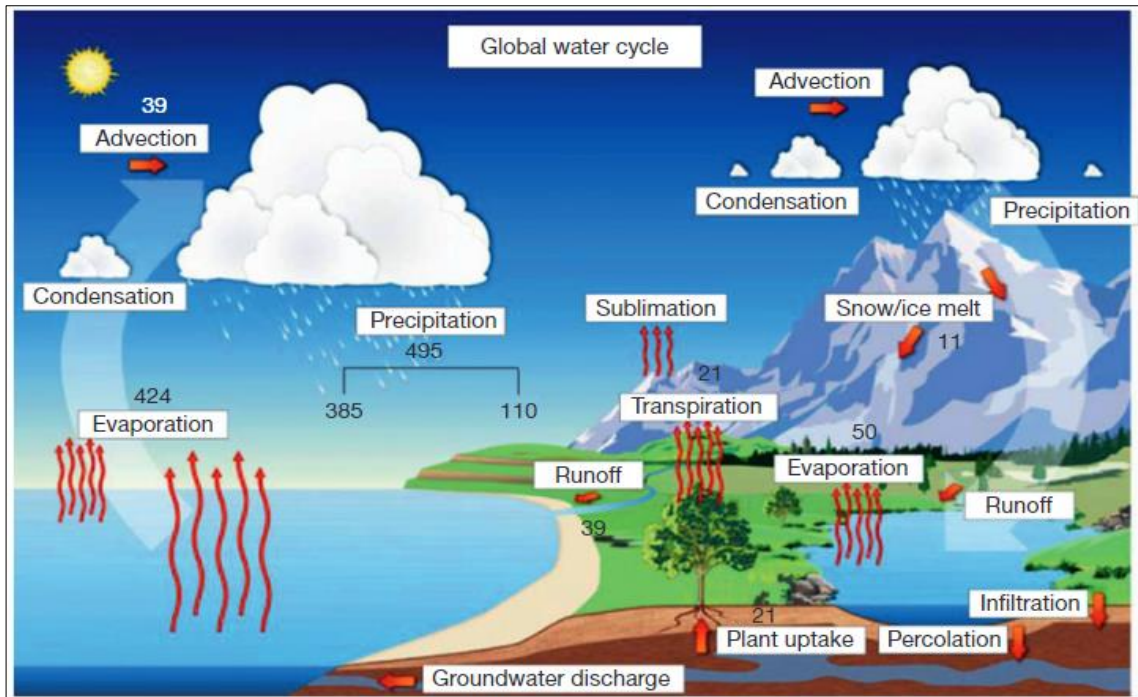
Τα δεδομένα της μελέτη προέρχονται από τρεις διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας με έντονη αγροτική δραστηριότητα όπου είναι εγκατεστημένοι οι αγρομετεωρολογικοί σταθμοί GAIATron, στην Λάρισα, στην Κομοτηνή και στον Μαραθώνα.

1.1. Ο Υδρολογικός Κύκλος

Οι βιολογικές δομές της χλωρίδας και της πανίδας στον πλανήτη μας προϋποθέτουν την αδιάλειπτη εξασφάλιση νερού σε κατάλληλη ποιότητα και ικανή ποσότητα. Η κυρίαρχη φυσική λειτουργία της Γης που εξασφαλίζει τον συνεχή ανεφοδιασμό της βιόσφαιρας με νερό είναι ο υδρολογικός κύκλος: η αέναη κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την ξηρά που συνοδεύεται και από αλλαγές στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του (Koutsoyiannis, 1999).

Ο πιο διαδεδομένος φυσικός κύκλος ισορροπίας, ο υδρολογικός κύκλος, αποτελεί την σχηματική περιγραφή μίας σειράς διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί στη φύση μεταξύ θάλασσας, ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσας (Καραβίτης, 2008).

Η κυκλοφορία του νερού πραγματοποιείται από μια υδρολογική λεκάνη σε μία άλλη μέσω φυσικών διεργασιών όπως η εξάτμιση, η συμπύκνωση, η διήθηση και η επιφανειακή απορροή. Η επιφάνεια της Γης καλύπτεται κατά 70% από νερό, το οποίο ανέρχεται σε $1.4 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$. Από αυτό, το 97% βρίσκεται στους ωκεανούς ως αλμυρό νερό και το 3% αποτελούν τις πηγές γλυκού νερού, όπως τα ποτάμια, οι λίμνες, οι παγετώνες και οι υπόγειοι υδροφορείς (Shiklomanov and Rodda, 2004). Η ηλιακή ακτινοβολία προκαλεί την εξάτμιση για τη μεταφορά περίπου $577 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ νερού από την επιφάνεια της Γης στην ατμόσφαιρα, εκ των οποίων το 86% συνεισφέρουν οι ωκεανοί και το υπόλοιπο 14% η ξηρά (David Pimentel et al., 2004; Shiklomanov IA, 1993). Το νερό που εξατμίζεται από την επιφάνεια της Γης φτάνει στην ατμόσφαιρα όπου συμπυκνώνεται σχηματίζοντας σταγονίδια νερού και στη συνέχεια φτάνει στη γη με τη μορφή βροχόπτωσης (βροχή, χιόνι, χαλάζι) που αντιπροσωπεύει σχεδόν το 20% της παγκόσμιας βροχόπτωσης. Το πλεονάζον νερό, που πέφτει στο έδαφος, επιστρέφει στους ωκεανούς μέσω των ποταμών και των υπόγειων υδάτων ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο του νερού (David Pimentel et al., 2004; Shiklomanov IA, 1993). Επομένως, η ηλιακή ενέργεια μετακινεί κάθε χρόνο σημαντική ποσότητα νερού από τους ωκεανούς στη στεριά μέσω της ατμόσφαιρας, καθιστώντας έτσι τον υδρολογικό κύκλο ζωτικής σημασίας όχι μόνο για την ανθρώπινη ζωή και το φυσικό οικοσύστημα, αλλά και για τη γεωργική και βιομηχανική παραγωγή (Aditya Abha Singh, Arvind K. Singh, 2021).



Εικόνα 1. Ο παγκόσμιος κύκλος του νερού, με τις ροές σε $10^{12} \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ μετά από το U.S. University Corporation for Atmospheric Research, <https://spark.ucar.edu/longcontent/water-cycle>, with updates from Durack et al. (2012). Γραφική απεικόνιση προσαρμοσμένη από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/index.htm>.

Ωστόσο, ο υδρολογικός κύκλος έχει αρχίσει να μεταβάλλεται λόγω των δυσμενών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας. Οι διεργασίες που εμπλέκονται στον υδρολογικό κύκλο εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία. Έχει παρατηρηθεί ότι οι παγκόσμιες θερμοκρασίες μεταβάλλονται αυξητικά σταθερά επί εκατομμύρια χρόνια και επηρεάζουν άμεσα τα πρότυπα βροχοπτώσεων, την ένταση των μουσώνων, τις συγκεντρώσεις υδρατμών, το σχηματισμό νεφών, τις εποχιακές αλλαγές και τα πρότυπα ροής των ποταμών. Η άνοδος της θερμοκρασίας και η αλλαγή του κλίματος έχει εν μέρει εντείνει αυτόν τον κύκλο, επειδή η άνοδος της παγκόσμιας θερμοκρασίας εξατμίζει περισσότερο νερό από τον ωκεανό και την ξηρά. Ο θερμός αέρας συγκρατεί περισσότερους υδρατμούς, οι οποίοι με τη σειρά τους παράγουν πιο έντονες βροχοπτώσεις που προκαλούν πλημμύρες στις παράκτιες περιοχές. Ο θερμός αέρας αυξάνει επίσης τον ρυθμό εξάτμισης που εντείνει τη διαδικασία εξάτμισης στη γη, η οποία προκαλεί την εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας σε μια χρονική περίοδο και έτσι εντείνει την κατάσταση ξηρασίας στις εσωτερικές περιοχές της ηπείρου. Επομένως, οι αλλαγές στα κλιματικά πρότυπα και η αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας επιταχύνουν τον κύκλο του νερού, οδηγώντας σε αλλαγές στα ακραία κλιματικά φαινόμενα, όπως εντονότερες βροχοπτώσεις, καταστάσεις έκρηξης νεφών, συχνές καταιγίδες και συνθήκες ξηρασίας. Αυτή η άμεση επίδραση στον υδρολογικό κύκλο θα οδηγήσει επίσης σε αλλαγές στους υδάτινους πόρους (Aditya Abha Singh, Arvind K. Singh, 2021).

1.2. Κλιματική Αλλαγή και Υδατικοί Πόροι

Με τον όρο κλίμα εννοούμε τις καιρικές συνθήκες (θερμοκρασία, κατακρημνίσματα και ανέμους) που επικρατούν σε μια περιοχή, για μια ελάχιστη χρονική περίοδο 30 ετών (European Environmental Agency, 2011a; National Snow and Ice Data Center, 2019). Η

μεταβολή στις στατιστικές ιδιότητες του κλίματος (μέσες τιμές, μεταβλητότητα, ακραίες τιμές) που διαρκεί για πολλές δεκαετίες χαρακτηρίζεται ως “κλιματική αλλαγή” (Australian Academy of Science, 2015).

Το νερό αποτελεί σημαντικό φυσικό πόρο για τη διατήρηση της ζωής και την ισορροπία των οικοσυστημάτων του πλανήτη. Ο συνδυασμός της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής με τη μη ορθολογική διαχείριση του νερού μπορεί να επιφέρει διαταραχές σε μεγάλο βαθμό στη βιολογική ισορροπία των ειδών και κατ’ επέκταση να θέσει σε κίνδυνο το συνολικό οικοσύστημα (IPPC, 2008).

Το κλίμα, το νερό, τα βιοφυσικά και κοινωνικοοικονομικά συστήματα συνδέονται με πολύπλοκο τρόπο, με αποτέλεσμα να αλληλοεπηρεάζονται σε ενδεχόμενες αλλαγές. Επομένως, η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στις κλιματικές μεταβολές και το νερό επιβάλλει τη βελτίωση της κατανόησης που έχουμε για την ανθρωπογενή ή μη κλιματική αλλαγή, τις επιπτώσεις της και τον τρόπο μετριασμού της. Η κλιματική αλλαγή είναι ικανή να επηρεάσει τους υδατικούς πόρους. Το νερό περιέχεται σε όλα τα μέρη του κλιματικού συστήματος: ατμόσφαιρα, υδρόσφαιρα, κρυόσφαιρα, επιφάνεια του εδάφους και βιόσφαιρα. Οι παρατηρούμενες αλλαγές στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και το ισοζύγιο της ακτινοβολίας επηρεάζει άμεσα τον υδρολογικό κύκλο (Douville, H., et al, 2021).

Η ανθρωπογενής κλιματική αλλαγή έχει προκαλέσει πολλές αισθητές αλλαγές στον παγκόσμιο κύκλο του νερού από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Η υπερθέρμανση του πλανήτη συνέβαλε σε μια συνολική αύξηση της ατμοσφαιρικής υγρασίας και της έντασης των βροχοπτώσεων, στην αύξηση της χερσαίας εξατμισοδιαπνοής και επηρέασε τα παγκόσμια πρότυπα ξηρασίας, ενίσχυσε τις αντιθέσεις στην επιφανειακή αλατότητα και την κατακρήμνιση μείον την εξάτμιση πάνω από τους ωκεανούς (Douville, H., et al, 2021)

Η εξατμισοδιαπνοή είναι ένα σημαντικό στοιχείο του κύκλου του νερού και οι πιθανές αλλαγές στην εξατμισοδιαπνοή μπορούν, μεταξύ άλλων, να επηρεάσουν τη διαχείριση των υδάτων και τη γεωργική παραγωγή. Η αλλαγή στις χρήσεις γης και η άντληση του νερού για άρδευση έχουν επηρεάζουν τις τοπικές και περιφερειακές επιδράσεις στον κύκλο του νερού. Η μεγάλης κλίμακας αποψίλωση των δασών πιθανόν μείωσε την εξατμισοδιαπνοή και τη βροχόπτωση και αύξησε την επιφανειακή απορροή στις περιοχές αυτές. Ακόμη, η αστικοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση τις τοπικές βροχοπτώσεις και κατά συνέπεια την ένταση της επιφανειακής απορροής (Douville, H., et al, 2021).

2. Η έννοια της εξατμισοδιαπνοής

Ο συνδυασμός των δυο ξεχωριστών διεργασιών, όπου το νερό αφ' ενός αφαιρείται από την εδαφική επιφάνεια μέσω εξάτμισης και αφετέρου από τη βλάστηση μέσω διαπνοής ονομάζεται εξατμισοδιαπνοή (Allen et al., 1998).

2.1. Εξάτμιση

Εξάτμιση ονομάζεται η διεργασία κατά την οποία το νερό βρίσκεται σε υγρή φάση μεταπίπτει σε αέρια φάση και απομακρύνεται από την επιφάνεια εξάτμισης. Το νερό μπορεί να εξατμίζεται από διάφορες επιφάνειες, όπως λίμνες, ποτάμια, έδαφος κλπ (Allen et al., 1998).

Στη μετάβαση του νερού στην αέρια φάση απαιτείται ενέργεια. Εξάτμιση συμβαίνει όταν τα μόρια του νερού αποκτούν αρκετή κινητική ενέργεια, ώστε να χάσουν το δεσμό τους με τα γειτονικά τους μόρια. Όταν συμβεί αυτό, η μέση κινητική ενέργεια των μορίων που απομένουν στην υγρή φάση είναι ελαφρώς μικρότερη και έτσι η θερμοκρασία του υγρού μειώνεται. Γι' αυτό το λόγο η εξάτμιση λέγεται και διαδικασία ψύξης (cooling process). Η ενέργεια που απαιτείται για να μεταπηδήσουν τα μόρια του υγρού σε μόρια αέριας φάσης εκφράζεται ως λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, λ (latent heat of vaporization) και ισοδυναμεί με 600 cal ενέργειας για την εξάτμιση ενός γραμμαρίου νερού (ή 2.45 MJ/kg σε θερμοκρασία 20°C).

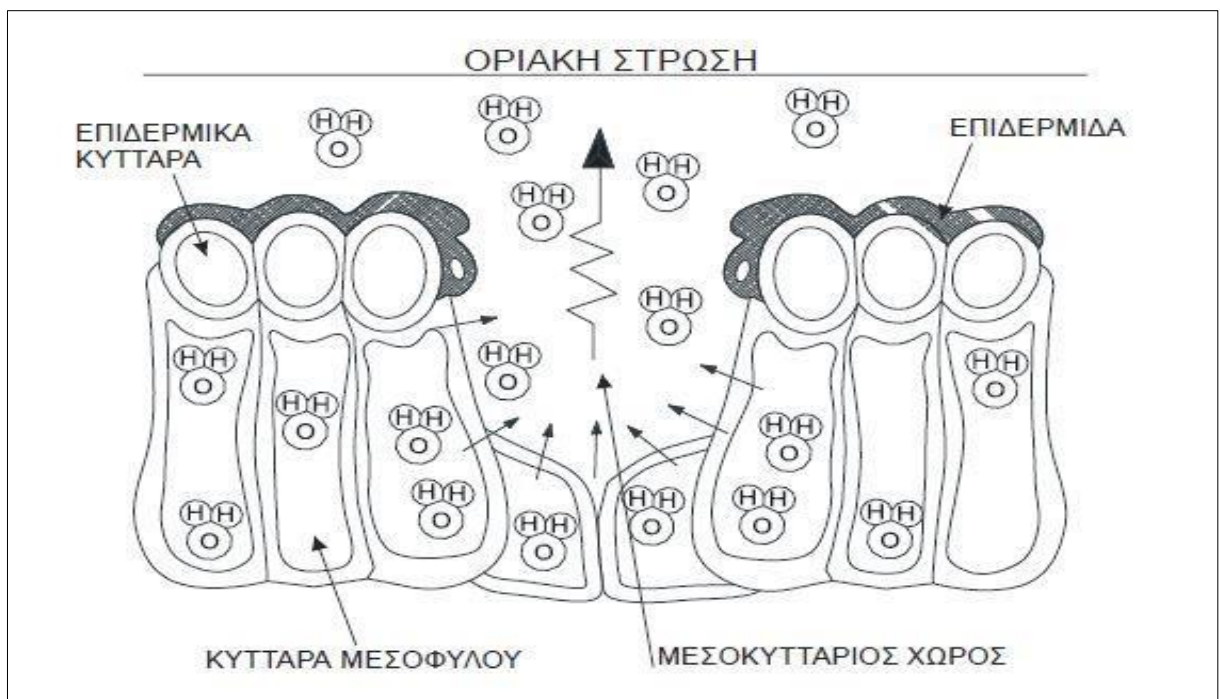
Το νερό μόλις μεταπέσει στην αέρια φάση απομακρύνεται από την επιφάνεια εξάτμισης. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η διαφορά μεταξύ της τάσης των υδρατμών πάνω από την επιφάνεια εξάτμισης και της ατμόσφαιρας. Όσο η διεργασία της εξάτμισης εξελίσσεται, ο περιβάλλον αέρας σταδιακά μετατρέπεται σε κορεσμένος με υδρατμούς και η διεργασία αυτή ελαττώνεται και μπορεί να σταματήσει, αν ο υγρός αέρας δεν απομακρυνθεί. Η αλλαγή του υγρού αυτού αέρα από έναν ξηρότερο εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Συνεπώς η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η ατμοσφαιρική υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου είναι οι κλιματολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία της εξάτμισης.

Συμπύκνωση (condensation) συμβαίνει όταν τα μόρια της αέριας φάσης του νερού χάσουν ενέργεια, ή έχουν μικρότερη θερμοκρασία και τότε επανασυνδέονται με άλλα γειτονικά μόρια. Όταν συμβεί αυτό η θερμοκρασία του αέρα αυξάνει. Έτσι η συμπύκνωση θεωρείται διαδικασία θέρμανσης (warming process), οπότε με αυτόν τον τρόπο όταν συμπυκνώνεται ένα γραμμάριο νερού θα αποδοθούν στο περιβάλλον 600 cal ενέργειας.

Όταν η επιφάνεια εξάτμισης είναι το έδαφος, ο βαθμός σκίασής του από τη φυτοκόμη και η διαθεσιμότητα του νερού στην επιφάνεια εξάτμισης επηρεάζουν τη διεργασία της εξάτμισης. Οι συχνές βροχοπτώσεις, η άρδευση και η ανοδική κίνηση του νερού από έναν υδροφόρο ορίζοντα με υψηλή στάθμη διατηρούν υγρή την εδαφική επιφάνεια. Όπου το έδαφος είναι σε θέση να τροφοδοτεί πλήρως τις ανάγκες νερού για εξάτμιση, τότε αυτή εξαρτάται αποκλειστικά από μετεωρολογικούς παράγοντες. Παρ' όλα αυτά, όταν τα διαστήματα μεταξύ βροχής και άρδευσης είναι μεγάλα και η ικανότητα του εδάφους να διατηρεί την υγρασία της επιφάνειάς του μειώνεται, τότε η περιεκτικότητα της επιφάνειας σε νερό πέφτει και τελικά ξεραινεται. Υπό αυτές τις συνθήκες, η περιορισμένη διαθεσιμότητα του νερού καθίσταται ελεγκτικός παράγοντας της εδαφικής εξάτμισης. Σε αυτή την περίπτωση απουσίας οποιασδήποτε διαθεσιμότητας νερού, η εξάτμιση μειώνεται δραματικά και μπορεί ακόμα και να σταματήσει (Allen et al., 1998).

2.2. Διαπνοή

Η διεργασία της διαπνοής αποτελεί μια βιοφυσική διαδικασία και περιλαμβάνει την εξάτμιση του νερού που περιέχεται στους ιστούς των φυτών και την απομάκρυνσή του προς την ατμόσφαιρα. Τα φυτά χάνουν νερό μέσα από τα στομάτια. Τα στόματα είναι μικρά ανοίγματα στα φύλλα των φυτών μέσω των οποίων διέρχονται αέρια και υδατμοί. Το νερό είναι μικρά ανοίγματα στα φύλλα των φυτών μέσω των οποίων διέρχονται αέρια και υδατμοί. Το νερό, μαζί με τα θρεπτικά συστατικά, λαμβάνεται από τις ρίζες και διέρχεται μέσω των αγγείων σε όλο το φυτό. Η εξάτμιση λαμβάνει χώρα μέσα στο φύλλο και συγκεκριμένα στους μεσοκυτταρικούς χώρους και η μεταφορά υδατμών στην ατμόσφαιρα ελέγχεται από τα στομάτια. Σχεδόν όλη η ποσότητα του προσλαμβανόμενου νερού χάνεται μέσω του μηχανισμού της διαπνοής και μόνο ένα μικρό κλάσμα χρησιμοποιείται εσωτερικά στο φυτό. Η διαπνοή, σαν άμεση εξάτμιση, εξαρτάται από τη διαθέσιμη ενέργεια, την κλίση των υδατμών και τον άνεμο. Συνεπώς η ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου θεωρούνται σημαντικοί παράγοντες για το ρυθμό της διαπνοής. Αφ' ετέρου η ποσότητα του εδαφικού νερού, η συγκέντρωση αλάτων καθώς και η εδαφική επαφή με το ριζόστρωμα επιδρούν επίσης στο ρυθμό διαπνοής. Τα χαρακτηριστικά των φυτών, η καλλιεργητική πρακτική και τα στάδια ανάπτυξης μίας συγκεκριμένης καλλιέργειας είναι επιπρόσθετοι παράγοντες που μπορούν να καθορίσουν διαφορετικούς ρυθμούς διαπνοής.



Εικόνα 2. Σχηματική απεικόνιση απλού στοματικού φύλλου ΠΗΓΗ: Διδακτορική Διατριβή Σ. Αλεξανδρή 2003

2.3. Εξατμισοδιαπνοή

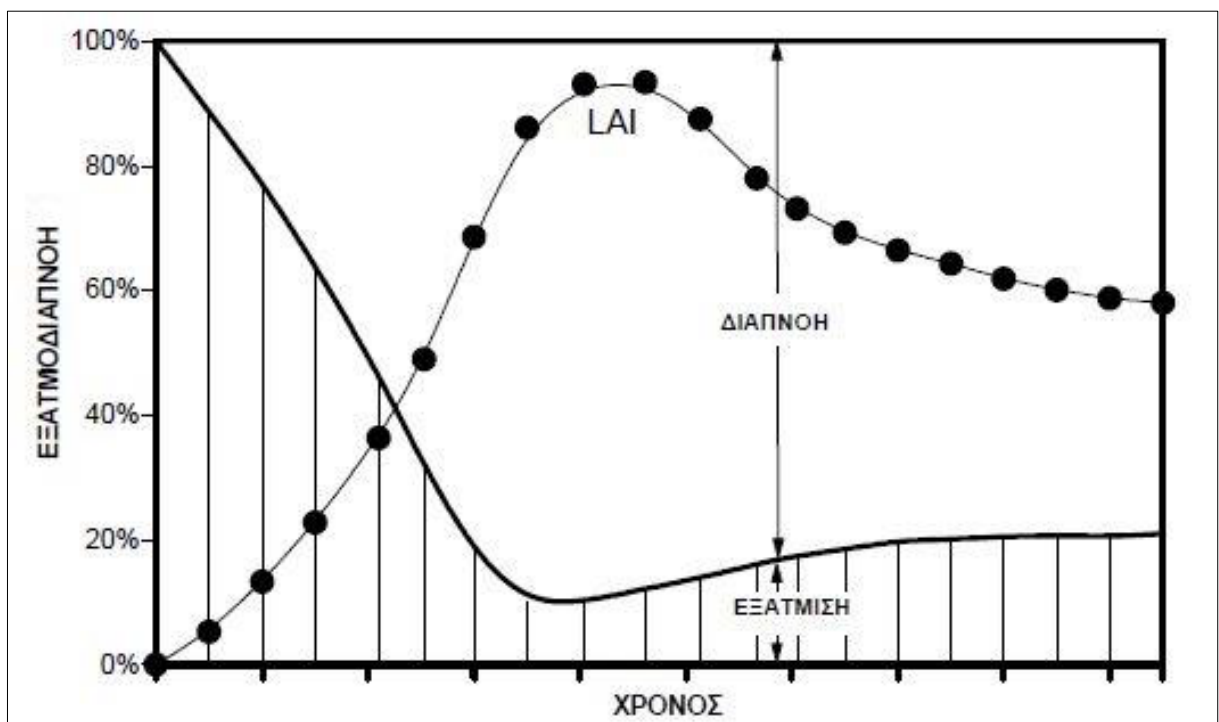
Με τον ευρύτερης σημασίας συλλεκτικό όρο Εξατμισοδιαπνοή **ET** (Evapotranspiration) νοείται το σύνολο των διαδικασιών με τις οποίες γίνεται μετατροπή της υγρής ή στερεάς φάσεως του νερού σε υδατμούς και οι οποίες λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια της γης ή σε μια σχετικώς στενή ζώνη υπεράνω ή κάτωθι αυτής.

Ο συλλεκτικός αυτός όρος περιλαμβάνει ειδικότερα:

- Την **εξάτμιση (evaporation)**, ήτοι την μετατροπή σε υδρατμούς της υγρής φάσεως του νερού από την επιφάνεια ποταμών, λιμνών ή άλλων στάσιμων ή ρεόντων υδάτων, την επιφάνεια ή το εσωτερικό γυμνού ή καλυμμένου με βλάστηση εδάφους και την επιφάνεια της βλαστήσεως
- Την **διαπνοή των φυτών (transpiration)**, η οποία συνίσταται στην μετατροπή σε υδρατμούς της υγρής φάσεως του νερού μέσω του φυλλώματος
- Την **εξάχνωση (sublimation)**, ήτοι την μετατροπή της στερεάς φάσεως του νερού κατ' ευθείαν σε υδρατμούς (από την επιφάνεια του πάγου ή χιονιού).

Η εξατμισοδιαπνοή είναι παράμετρος μεγάλης σπουδαιότητας για πολλές επιστήμες, συμπεριλαμβανομένου της σχεδίασης συστημάτων άρδευσης, του προγραμματισμού άρδευσης και των στραγγίσεων, καθώς επίσης και των υδρολογικών μελετών.

Η εξάτμιση και η διαπνοή μπορούν να συμβαίνουν ταυτόχρονα και δεν υπάρχει εύκολη μέθοδος διαχωρισμού των δύο διεργασιών. Εκτός από τη διαθεσιμότητα του νερού στην ανώτερη στρώση του εδάφους, η εξάτμιση από ένα καλλιεργούμενο έδαφος κατά ένα μεγάλο μέρος προσδιορίζεται από το κλάσμα της ολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας που φθάνει στην εδαφική επιφάνεια. Αυτό το κλάσμα ελαττώνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια της αύξησης του φυτού, από της αυξανόμενης φυλλική επιφάνεια που σκιάζει το έδαφος. Στα πρώτα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας, τον βασικό λόγο στην εξάτμιση κατέχει το έδαφος, αλλά καθώς τα φυτά αναπτύσσονται καλύπτοντας όλο και περισσότερο την επιφάνεια του εδάφους, η διαπνοή γίνεται η κύρια διαδικασία απώλειας νερού. Στην Εικόνα 3 φαίνεται σχηματικά η ποσοστιαία συνεισφορά των δύο διαδικασιών για τα στάδια μια τυπικής καλλιεργητικής περιόδου.



Εικόνα 3. Γραφική απεικόνιση της συμμετοχής εξάτμισης και διαπνοής σε μια τυπική καλλιεργητική περίοδο. ΠΗΓΗ: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Τροποποιημένη

Για την κατανόηση της έννοιας της εξατμισοδιαπνοής στον αγρό καθώς και για το σωστό τρόπο υπολογισμού της έχουν επικρατήσει δύο έννοιες, η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Στην πράξη ο υπολογισμός του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής, για μια συγκεκριμένη καλλιέργεια, απαιτεί πρώτα τον υπολογισμό της δυνητικής ή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και στη συνέχεια την εφαρμογή του κατάλληλου συντελεστή καλλιέργειας (K_c) για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας ET_c , δηλαδή της μέγιστης ET των καλλιεργειών σε άριστες συνθήκες καλλιέργειας για κάθε στάδιο ανάπτυξης.

Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_o) ορίζεται ο ρυθμός εξάτμισης από μία υποθετική καλλιέργεια αναφοράς με ύψος 0.12m με σταθερή συνολική αντίσταση επιφάνειας 70 sec/m και albedo 0.23, δηλαδή με συνθήκες παρόμοιες ρυθμού εξατμισοδιαπνοής που προέρχεται από μια εκτεταμένη πράσινη επιφάνεια γρασιδιού (ψυχρού τύπου) ομοιόμορφου ύψους 8-12 cm, δυναμικά αυξανόμενη, επαρκώς αρδευόμενη, και με πλήρη κάλυψη του εδάφους (Σημ. Εργ. Γεωργικής Μικρομετεωρολογίας, Σ. Αλεξανδρή). Οι περισσότερες από τις επιδράσεις των διάφορων κλιματικών συνθηκών ενσωματώνονται στην εκτίμηση της ET_o , συνεπώς αντιπροσωπεύει ένα δείκτη των κλιματικών απαιτήσεων.

Ως **Δυνητική εξατμισοδιαπνοή** (Potential evapotranspiration, ET_p , [mm/day]) χαρακτηρίζεται το ύψος του υδάτινου στρώματος το οποίο εξατμίζεται ή/και διαπνέεται ανά ημέρα από μια εκτεταμένη “πλήρως υγρή επιφάνεια” υπό τις υφιστάμενες ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Με τον όρο “πλήρως υγρή επιφάνεια” νοείται εκείνη η επιφάνεια για την οποία η διαθέσιμη προς εξάτμιση και διαπνοή ποσότητα νερού δεν αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα, ο οποίος έτσι μετατοπίζεται στις υφιστάμενες μικρο-μετεωρολογικές συνθήκες οι οποίες προσκομίζουν την απαιτούμενη για την εξατμισοδιαπνοή ενέργεια.

Η ET_p αποτελεί, συνεπώς, τον μέγιστο ρυθμό (πραγματικής) ET ο οποίος είναι δυνατός υπό υφιστάμενες μικρο-μετεωρολογικές συνθήκες.

Ως εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (Reference Crop evapotranspiration, ET_o , [mm/day]) χαρακτηρίζεται ο ρυθμός ET από μια εκτεταμένη επιφάνεια χλόης ύψους 8-15 cm, με ομοιόμορφη κάλυψη και ύψος, η οποία αναπτύσσεται ζωηρώς, καλύπτει πλήρως το έδαφος και έχει επάρκεια νερού.

Η ET_o προσδιορίζεται σχετικώς εύκολα και είναι και είναι δυνατή η συσχέτιση αυτής με διάφορους μετεωρολογικούς παράγοντες. Προκύπτουν, έτσι, εμπειρικές ή ημιεμπειρικές σχέσεις με βάση τις οποίες καθίσταται περαιτέρω δυνατός ο υπολογιστικός προσδιορισμός της ET_o με χρήση των τιμών των σχετικών μετεωρολογικών παραγόντων.

Στη συνέχεια, με ταυτόχρονη μέτρηση της ET της καλλιέργειας αναφοράς, ET_o , και διαφόρων άλλων καλλιεργειών, ET_c , προκύπτουν οι τιμές των καλούμενων φυτικών συντελεστών k_c των υπόψη καλλιεργειών ως οι λόγοι $k_c = ET_c / ET_o$, οι οποίοι ενσωματώνουν την επίδραση των χαρακτηριστικών εκάστης καλλιέργειας στην εξατμισοδιαπνοή της.

2.3.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή

Ως βασική προϋπόθεση στην κατωτέρω ανάπτυξη και γενικότερα στην θεώρηση του φαινομένου της ET λαμβάνονται ότι εξατμίζουσα επιφάνεια είναι επαρκώς μεγάλη εις τρόπον ώστε η κατά την οριζόντια κατεύθυνση μεταβολή των επιδρώντων παραγόντων να

είναι μηδενική. Όπου τούτο δεν είναι εφικτό γίνεται ειδική περί τούτου μνεία και γίνονται οι σχετικές διορθώσεις στις προκύπτουσες σχέσεις.

a) Ο τύπος της εξατμίζουσας επιφάνειας

Η εξατμίζουσα επιφάνεια μπορεί κατ' αρχήν να είναι η ελεύθερη μιας μάζας νερού σε κίνηση ή στάση (επιφάνεια νερού ενός ρεύματος, μιας φυσικής ή τεχνητής λίμνης, μιας μάζας νερού σε μια φυσική κοιλότητα του εδάφους, των σταγόνων της βροχής κατά την διάρκεια της βροχοπτώσεως ή του νερού της βροχής κατά την διάρκεια της βροχοπτώσεως ή του νερού της βροχής το οποίο έχει συγκρατηθεί στην επιφάνεια της βλαστήσεως). Ακόμη εξατμίζουσα επιφάνεια αποτελεί η επιφάνεια και το εσωτερικό του βλαστού και τέλος η φυλλώδης επιφάνεια της βλαστήσεως αυτή καθ' αυτήν με την διαδικασία της διαπνοής.

b) Η διαθεσιμότητα του νερού, η οποία μπορεί να κυμαίνεται από απεριόριστη (π.χ. ελεύθερη υδάτινη επιφάνεια) μέχρι πολύ περιορισμένη (π.χ. έδαφος, λόγω της απορροφητικής δυνάμεως με την οποία τα συσσωματώματα των εδαφικών κόκκων συγκρατούν την εδαφική υγρασία).

c) Η διαθέσιμη ενέργεια.

Η διαδικασία μετατροπής της υγρής ή στερεάς φάσεως του νερού σε υδρατμούς απαιτεί την κατανάλωση σημαντικής ποσότητας ενέργειας υπό μορφή θερμότητας (λανθάνουσα θερμότητα εξατίσεως η οποία για θερμοκρασία νερού 13 °C ανέρχεται σε 590 cal/g νερού). Η ενέργεια αυτή, για μια ορισμένη περιοχή, προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία βραχέος μήκους κύματος, την ατμοσφαιρική ή γήινη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, την κατακόρυφη ανταλλαγή (μεταφορά) θερμότητας μεταξύ εδάφους – ατμόσφαιρας, την οριζόντια ανταλλαγή θερμότητας μέσω της εισροής – εκροής νερού στην θεωρούμενη περιοχή ή της οριζόντιας μεταφοράς θερμότητας υπό του ανέμου και, τέλος, από την αποθηκευμένη στην περιοχή ενέργεια. Από τις διαφορές, ως ανωτέρω, πηγές ενέργειας η μικροκυματική ηλιακή ακτινοβολία ασκεί κυριαρχική επίδραση. Ως εκ τούτου η ET αποτελεί συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους, την εποχής του έτους, της ώρας της ημέρας και του βαθμού νεφώσεως.

d) Η κατά την κατακόρυφο κατανομή της τάσεως της ατμοσφαιρικής υγρασίας.

Στην άμεση περιοχή της εξατμίζουσας επιφάνειας η συγκέντρωση των υδρατμών είναι η μέγιστη δυνατή, ήτοι ο αέρας είναι κορεσμένος και η τάση των υδρατμών είναι ίση με την μέγιστη τάση $e_s(T)$ στην θερμοκρασία T_s της εξατμίζουσας επιφάνειας. Εάν ο χώρος υπεράνω της εξατμίζουσας επιφάνειας είναι περιορισμός (π.χ. εξάτμιση εντός κλειστού δοχείου ή χώρου) τότε μετά πάροδο κάποιου χρόνου ο χώρος αυτός καθίσταται κορεσμένος υδρατμών και ο καθαρός ρυθμός εξατίσεως μηδενίζεται. Εάν όμως, όπως συμβαίνει στην ατμόσφαιρα, ο χώρος υπεράνω της εξατμίζουσας επιφάνειας είναι ελεύθερος, τότε οι υδρατμοί διαχέονται κατακορύφως και η συγκέντρωση των υδρατμών, συνεπώς και η τάση αυτών, μειώνεται με το ύψος. Δημιουργείται έτσι μια διαφορά δυναμικού από απόψεως τάσεως των υδρατμών, $e_s(T_s) - e_a$, όπου e_a είναι η τάση των υδρατμών στον αέρα σε ύψος Z_a υπεράνω της εξατμίζουσας επιφάνειας. Η διαφορά αυτή καλείται **έλλειμμα της τάσεως των υδρατμών**. Το έλλειμμα αυτό αποτελεί μέρος της κινητήριας δύναμης για την απαγωγή (μοριακή διάχυση)

των υδρατμών από την άμεση περιοχή της εξατμίζουσας επιφάνειας προς την ατμόσφαιρα και την συνέχιση του φαινομένου της απλής εξατμίσεως ή της εξατμισοδιαπνοής.

e) Η κατά την κατακόρυφο κατανομή της ταχύτητας του ανέμου.

Ο άνεμος, ήτοι οριζόντια κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα, στην άμεση περιοχή της εξατμίζουσας επιφάνειας επιβραδύνεται λόγω της αντιστάσεως την οποία προβάλλει η εξατμίζουσα επιφάνεια (υδάτινη επιφάνεια, επιφάνεια γυμνού εδάφους ή βλάστησης). Η κίνηση αυτή ατμοσφαιρικού αέρα είναι σχεδόν πάντοτε τυρβώδης. Είναι δε γνωστό ότι στην τυρβώδη κίνηση ενός ρευστού παρουσιάζονται δίνες της μάζας του κινούμενου ρευστού οι οποίες μετακινούνται κατά τυχαίο τρόπο κατά το περιορισμένο χρονικό διάστημα το οποίο μεσολαβεί από τη στιγμή της εξαφανίσεώς των. Το φαινόμενο αυτό, γνωστό με την ονομασία τύρβη, αποτελεί έναν περισσότερο αποτελεσματικό μηχανισμό, έναντι της μοριακής διάχυσης, για την ανταλλαγή της μάζας και των ιδιοτήτων οι οποίες την συνοδεύουν, όπως είναι π.χ. η ορμή, η θερμότητα, η περιεχόμενη υγρασία κλπ., μεταξύ ενός στρώματος αέρα πλησίον της επιφάνειας της γης και εκείνων τα οποία ευρίσκονται ψηλότερα στην ατμόσφαιρα.

Η τύρβη, και η μέσω αυτής κατακόρυφη μεταφορά υδρατμών από την εξατμίζουσα προς την υπερκείμενη ατμόσφαιρα, είναι αποτέλεσμα της οριζόντιας κινήσεως του ατμοσφαιρικού αέρα και της καθ' ύψος μεταβολής της ταχύτητας αυτού σύμφωνα με τον λογαριθμικό νόμο (από Τεχνική Υδρολογία, Κεφ.5.1. Σακκά Ιωάννου, 2007)

2.3.2. Μετεωρολογικοί παράγοντες που καθορίζουν την ET

Η εξατμισοδιαπνοή, σε συνθήκες επαρκούς νερού, εξαρτάται από διάφορους μετεωρολογικούς παράγοντες, οι οποίοι παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια για την εξάτμιση του νερού και την απομάκρυνση των υδρατμών από την επιφάνεια εξάτμισης. Οι παράγοντες αυτοί παρατίθενται και αναλύονται στη συνέχεια.

a. Ηλιακή Ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία (R_s) είναι η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας που είναι σε θέση να αλλάξει μεγάλες ποσότητες της υγρής φάσης του νερού σε υδρατμούς. Το ποσό ακτινοβολίας που μπορεί να φθάσει στην επιφάνεια εξάτμισης καθορίζεται από τη γεωγραφική θέση και την εποχή του έτους. Η πραγματική ηλιακή ακτινοβολία που φθάνει στην επιφάνεια εξάτμισης εξαρτάται από τη θολότητα της ατμόσφαιρας και από μερικούς άλλους παράγοντες, όπως είναι η παρουσία της νέφωσης, η οποία αντανakλά και απορροφά μεγάλα ποσοστά από το συνολικό ποσό της ακτινοβολίας. Στην αξιολόγηση της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο ρυθμό της εξατμισοδιαπνοής, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι δεν χρησιμοποιείται όλη η διαθέσιμη ενέργεια για εξάτμιση. Ένα μέρος της χρησιμοποιείται για θέρμανση της ατμόσφαιρας και ένα άλλο μέρος για θέρμανση του εδάφους. Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από την ατμόσφαιρα και η θερμότητα που εκπέμπεται από τη γη αυξάνουν τη θερμοκρασία αέρα T . Η αισθητή θερμότητα του περιβάλλοντος αέρα μεταφέρει ενέργεια στην καλλιέργεια και υπό αυτήν την μορφή ασκεί κάποιον έλεγχο επηρεάζοντας το ρυθμό της εξατμισοδιαπνοής.

b. Θερμοκρασία του Αέρα

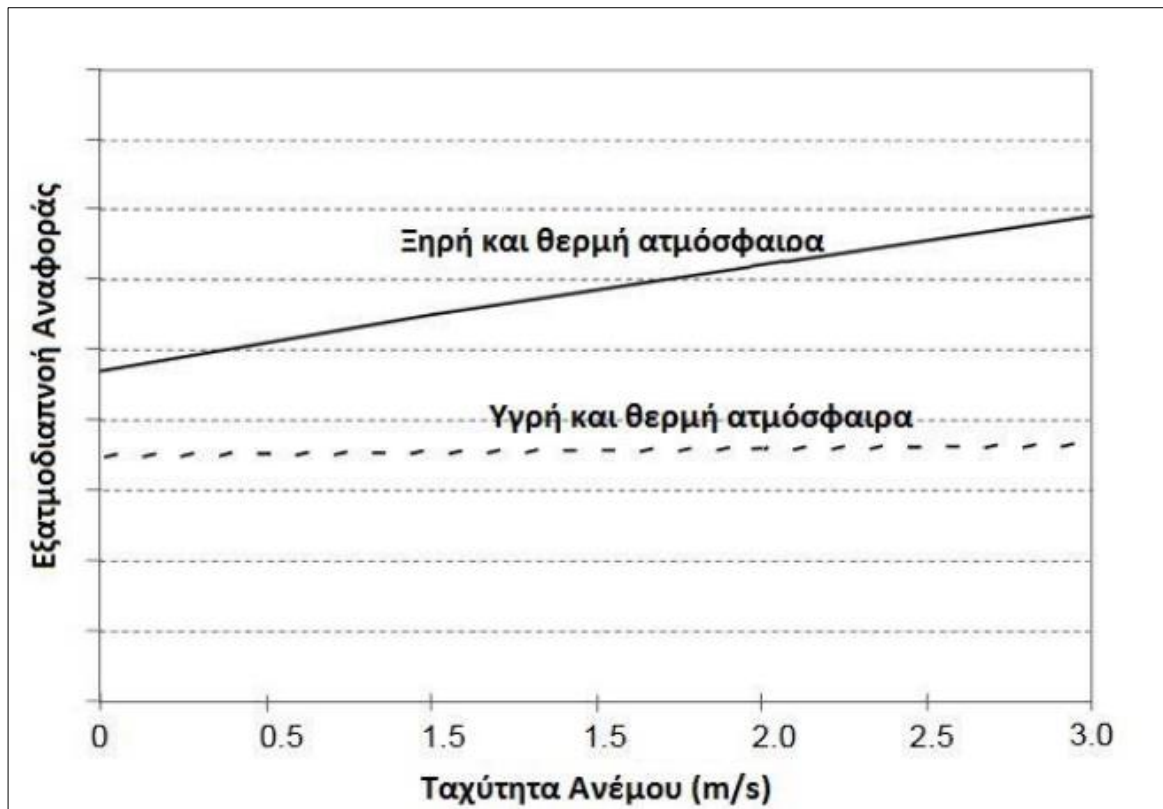
Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από την ατμόσφαιρα και η θερμότητα που εκπέμπεται από τη Γη αυξάνουν τη θερμοκρασία του αέρα. Η αισθητή θερμότητα του περιβάλλοντος αέρα μεταφέρει ενέργεια στα φυτά με αποτέλεσμα να έχει μια καθοριστική επιρροή στο ρυθμό εξατμισοδιαπνοής. Σε αίθριες και θερμές ημέρες, η απώλεια νερού μέσω της εξατμισοδιαπνοής είναι μεγαλύτερη σε σχέση με νεφελώδεις ψυχρές ημέρες.

c. Ατμοσφαιρική Υγρασία

Ενώ ο ανεφοδιασμός ενέργειας από τον ήλιο και τον περιβάλλοντα αέρα είναι η βασική κινητήρια δύναμη για εξάτμιση του νερού, η διαφορά της τάσης μεταξύ των υδρατμών της εξατμίζουσας επιφάνειας και του περιβάλλοντα αέρα είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την απομάκρυνση των υδρατμών. Επαρκώς αρδευόμενα εδάφη, σε ζεστές και ξηρές περιοχές καταναλώνουν μεγάλα ποσά νερού, λόγω της αφθονίας σε ενέργεια και της μεγάλης εξατμιστικής ισχύς της ατμόσφαιρας. Σε υγρές τοπικές περιοχές, παρόλη τη μεγάλη εισροή ενέργειας, η υψηλή ατμοσφαιρική υγρασία θα μειώσει το ρυθμό εξατμισοδιαπνοής. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, όπου ο αέρας είναι ήδη κοντά στον κορεσμό, η δυνατότητα περαιτέρω εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας με νερό είναι μικρή και έτσι ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής είναι μικρότερος σε σχέση με μια ξηρή περιοχή.

d. Ταχύτητα Ανέμου

Ο ανεφοδιασμός ενέργειας από τον ήλιο και τον περιβάλλοντα αέρα είναι η βασική κινητήρια δύναμη για εξάτμιση του νερού και η διαφορά της τάσης υδρατμών μεταξύ της εξατμίζουσας επιφάνειας και του περιβάλλοντος αέρα είναι ο καθοριστικός παράγοντας για την απομάκρυνση των υδρατμών. Η διαδικασία της απομάκρυνσης των υδρατμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την ταχύτητα και τον στροβιλισμό του αέρα, διαδικασία με την οποία απομακρύνεται μεγάλη μάζα αέρα μακριά από την επιφάνεια που εξατμίζει. Κατά τη διαδικασία εξάτμισης του νερού, ο αέρας πάνω από την επιφάνεια εξάτμισης εμπλουτίζεται βαθμιαία με υδρατμούς. Εάν ο αέρας δεν αντικαθίσταται συνεχώς με ξηρότερο αέρα, η κατευθυντήρια δύναμη απομάκρυνσης των υδρατμών και ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής μειώνεται. Η άμεση μέτρηση της υγρασιακής κατάστασης του αέρα, συνδέεται έμμεσα και αποτελεί σημαντικό δείκτη της παραπάνω διαδικασίας (Αλεξανδρής, 2003, Κεφ.3)



Εικόνα 4. Απεικόνιση της επίδρασης του ανέμου στην εξατμισοδιαπνοή σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες
 ΠΗΓΗ: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Τροποποιημένο

Στην παραπάνω Εικόνα 4 φαίνεται η συνδυαστική επίδραση των παραγόντων που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή για δύο διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Ο ρυθμός της εξατμισοδιαπνοής είναι μεγάλος σε ξηροθερμικές καιρικές συνθήκες εξαιτίας της ξηρότητας του αέρα και της ενέργειας που είναι διαθέσιμη από την ηλιακή ακτινοβολία και από την λανθάνουσα θερμότητα. Υπό αυτές τις συνθήκες, μεγάλη ποσότητα υδρατμών μπορεί να αποθηκευτεί στην ατμόσφαιρα, την ώρα που ο άνεμος διευκολύνει την απομάκρυνση του νερού, επιτρέποντας έτσι τον περαιτέρω εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας με νερό. Αντιθέτως, υπό το καθεστώς υψηλής ατμοσφαιρικής υγρασίας και της ύπαρξης νεφοσκεπής, ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής μειώνεται. Η επίδραση της αυξανόμενης ταχύτητας του ανέμου στην εξατμισοδιαπνοή φαίνεται από την κλίση των καμπυλών στην παραπάνω εικόνα 4. Όσο ξηρότερη είναι η ατμόσφαιρα τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή και τόσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της καμπύλης. Σε υγρές συνθήκες, ο άνεμος μπορεί μόνο να αντικαταστήσει τον κορεσμένο αέρα με έναν ελαφρώς λιγότερο κορεσμένο και να απομακρύνει θερμική ενέργεια.

Συνεπώς η επιρροή που ασκεί η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ μικρότερη από αυτή που θα ήταν υπό ξηρικές συνθήκες, όπου μικρές αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλες αλλαγές στο ρυθμό εξατμισοδιαπνοής.

2.4. Εμπειρικές Μέθοδοι Υπολογισμού Εξατμισοδιαπνοής

Οι εμπειρικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η Copais (Alexandris et al., 2006), η Valiantzas (Valiantzas, 2013) με βάση την ακτινοβολία (radiation based) και η Hargreaves Samani (George H. Hargreaves & Zohrab A. Samani, 1985)

με βάση τη θερμοκρασία (temperature based) οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω. Τέλος αναφέρεται και η μέθοδος Penman-Montheith, η οποία είναι η πιο ευρέως αποδεκτή μέθοδος υπολογισμού ET_o .

2.4.1. Copais (Alexandris et al., 2006)

Για την εξαγωγή της εμπειρικής αυτής σχέσης έγινε η χρήση επιφανειακής πολυωνυμικής ανάλυσης σε τρία διαδοχικά στάδια, προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές (C_i) που εισάγει το νέο εμπειρικό μοντέλο $ET_o = f(R_S, RH, T, C_i)$. Για τη βαθμονόμηση του προτεινόμενου μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε μοντέλο, χρησιμοποιήθηκε σύνολο ωριαίων μετεωρολογικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από την πειραματική θέση (Κωπαΐδα) για ένα έτος. Για την επαλήθευση της εγκυρότητας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν ανεξάρτητα ωριαία δεδομένα από τη συγκεκριμένη πειραματική θέση για άλλα τρία έτη, καθώς επίσης και ωριαία αντίστοιχα δεδομένα από το δίκτυο "CIMIS" (California Irrigation Management System) από το μετεωρολογικό σταθμό στο Davis Sacramento, CA (grass reference station).

Η μέθοδος υπολογισμού της ημερήσιας ET_o εκφράζεται μέσω της παρακάτω Εξίσωσης (1) καθώς και από τις Εξισώσεις (2) και (3).

$$ET_o = m_1 + m_2 C_2 + m_3 C_1 + m_4 C_1 C_2 \quad (1)$$

Όπου $m_1 = 0,057, m_2 = 0,277, m_3 = 0,643, m_4 = 0,124$ και

$$C_1 = 0,6416 - 0,00784RH + 0,372R_S - 0,00264R_S RH \quad (2)$$

$$C_2 = -0,0033 + 0,00812T + 0,101R_S - 0,00584R_S T \quad (3)$$

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

2.4.2. Valiantzas (Valiantzas, 2013)

Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου εκφράζεται από την Εξίσωση (4) η οποία δεν απαιτεί δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου.

$$ET_o \approx 0,0393R_S \sqrt{T + 9,5} - 0,19R_S^{0,6} \varphi^{0,15} + 0,078 (T + 20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (4)$$

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

2.4.3. Hargreaves - Samani (George H. Hargreaves & Zohrab A. Samani, 1985)

Η εξίσωση Hargreaves (1975) η οποία τροποποιήθηκε το 1985 για συνθήκες γρασιδιού, απαιτεί μετρήσεις θερμοκρασίες και ακολουθεί την Εξίσωση (5)

$$ET_o = 0,0023(T_{max} - T_{min})^{0,5} (T + 17,8) R_{\alpha} \quad (5)$$

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

2.4.4. 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 τη διαθεσιμότητα επαρκούς εδαφικής υγρασίας. Η χρήση της μεθόδου κάτω από άτυπες συνθήκες (non standardized) οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα και συνεπώς σε μη ορθολογική προσέγγιση των αναγκών και καλλιεργειών σε νερό. Η εξίσωση FAO – 56 PM για τον υπολογισμό της ET_o σε ημερήσια βάση έχει τη μορφή της Εξίσωσης 6.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad (6)$$

όπου 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 δύο μέτρων ($^{\circ}\text{C}$), u_2 είναι η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο των δύο μέτρων (m sec^{-1}), e_s είναι η τάση κορεσμένων υδρατμών (kPa), e_a είναι η πραγματική τάση των υδρατμών (kPa), Δ είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδρατμών με τη θερμοκρασία αέρα ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). Η ημερήσια πυκνότητα ροής θερμότητας του εδάφους θεωρείται $G=0$.

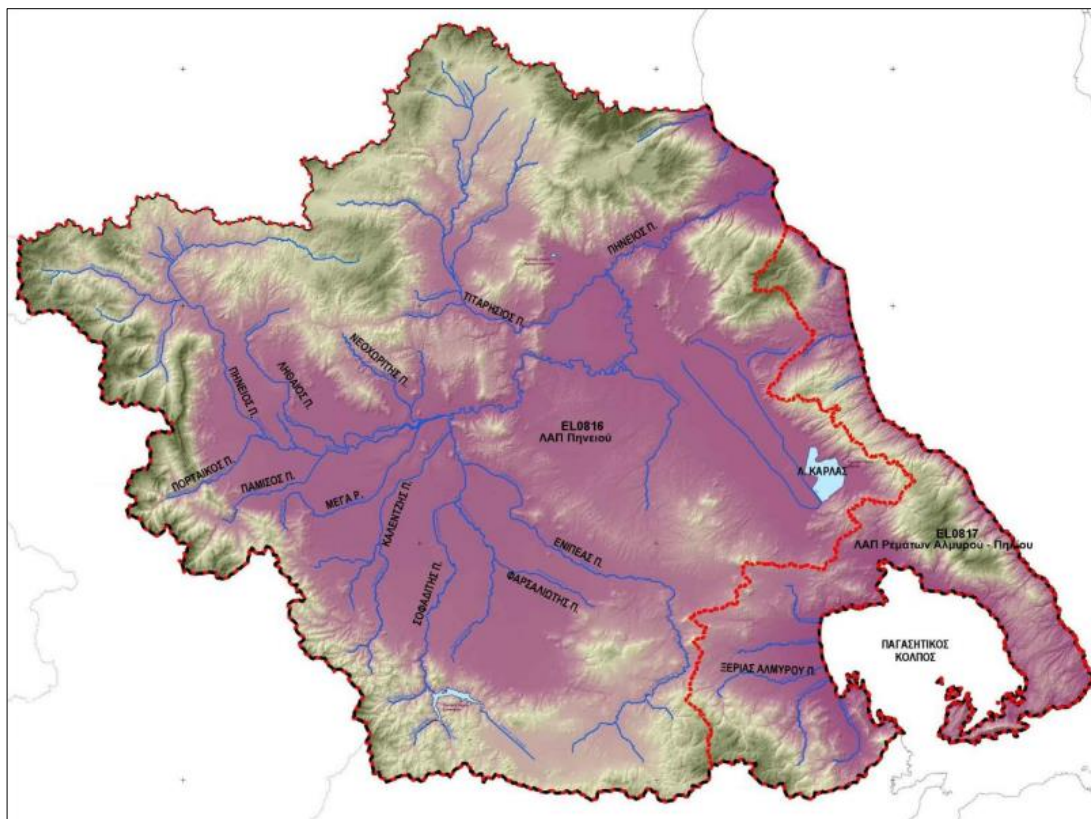
3. Περιοχές Μελέτης και Μετεωρολογικά Δεδομένα

3.1. Περιοχές Μελέτης

Στη παρούσα ενότητα αναλύονται και παρουσιάζονται οι περιοχές στις οποίες ήταν εγκατεστημένοι οι αγρομετεωρολογικοί ΓΑΙΑτρον και από τους οποίους πάρθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Οι περιοχές μελέτης ήταν η περιοχή της Θεσσαλίας και συγκεκριμένα ο Θεσσαλικός κάμπος, η Κομοτηνή και ο κάμπος του Μαραθώνα. Οι τρεις αυτές περιοχές παρουσιάζουν έντονη γεωργική δραστηριότητα, όπου η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων.

3.1.1. Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας - EL08

Το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας αποτελεί ένα από τα 14 Υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας και εκτείνεται στο μεγαλύτερο τμήμα του εντός της Περιφέρειας Θεσσαλίας. Περιλαμβάνει μικρό μέρος της Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας και ένα ελάχιστο μέρος των Περιφερειών Δυτικής και Κεντρικής Μακεδονίας.



Εικόνα 5. Λεκάνη Απορροής Ποταμού, Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας ΠΗΓΗ: 1^η Αναθεώρηση ΣΔΛΑΠ ΥΔ Θεσσαλίας, 2017)

Το διαμέρισμα παρουσιάζει σχετικά απλή γεωμορφολογική εικόνα, με τα ορεινά τμήματά του περιμετρικά και τα πεδινά στις κεντρικές περιοχές. Το Θεσσαλικό πεδίο αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα του υδατικού διαμερίσματος, είναι τεκτονικό βύθισμα που περιβάλλεται από τις οροσειρές Ολύμπου-Καμβουνίων στα βόρεια, Πίνδου στα δυτικά, Όθρυος στα νότια και Πηλίου-Όσσας στα ανατολικά.

Αναφορικά με το κλίμα της περιοχής, το διαμέρισμα της Θεσσαλίας διαιρείται σε τρεις περιοχές, την ανατολική παράκτια και ορεινή, με μεσογειακό κλίμα, την κεντρική πεδινή, με ηπειρωτικό κλίμα και τη Δυτική ορεινή, με ορεινό κλίμα.

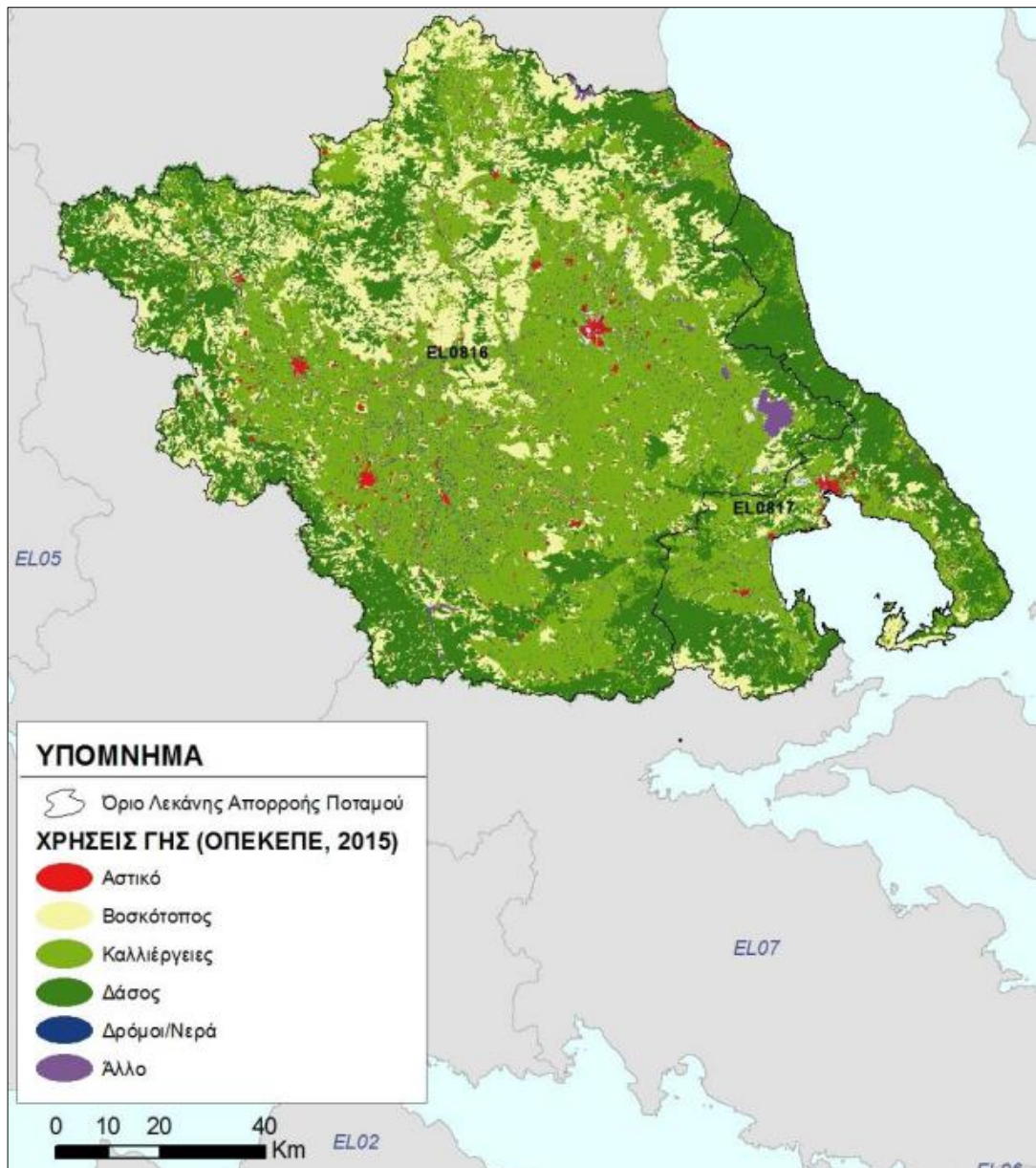
Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16 έως 17 °C. Το ετήσιο θερμομετρικό εύρος ξεπερνά τους 22 °C. Οι πιο θερμοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και οι πιο ψυχροί ο Ιανουάριο, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί είναι συχνοί και εμφανίζονται κατά την Νοεμβρίου – Απριλίου.

Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο διαμέρισμα είναι σχετικά μεγάλο στα δυτικά, στη συνέχεια μειώνεται στο πεδινό τμήμα και αυξάνεται πάλι στο ορεινό ανατολικό τμήμα. Ενδεικτικές τιμές της ετήσιας βροχόπτωσης είναι 468mm στο σταθμό Λάρισας, 550 mm στο σταθμό Τυρνάβου και 1.142 mm στον πιο ορεινό σταθμό του Μουζακίου. Στο σύνολο του διαμερίσματος, η μέση ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση εκτιμάται σε 678 mm. Οι πιο βροχεροί μήνες είναι από τον Οκτώβριο ως τον Ιανουάριο, ενώ οι πιο ξηροί είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Οι χιονοπτώσεις είναι συνηθισμένες, ιδιαίτερα στα ορεινά του διαμερίσματος, και γίνονται πιο έντονες από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά.

Σύμφωνα με στοιχεία του ΟΠΕΚΕΠΕ για το έτος 2015 οι χρήσεις γης για το ΥΔ Θεσσαλίας λαμβάνουν της εξής κατανομή που παρουσιάζεται στον Πίνακα 1

Πίνακας 1. Ποσοστιαία κάλυψη χρήσεων γης στο ΥΔ Θεσσαλίας. ΠΗΓΗ: (1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας, ΟΠΕΚΕΠΕ 2015)

Κατηγορίες χρήσεων γης	ΛΑΠ Πηνειού	ΛΑΠ Ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου
Αστικές	<1%	<1%
Βοσκότοποι	23%	11%
Καλλιέργειες	45%	34%
Δάσος	27%	52%
Δρόμοι/Υδατος	5%	2%



Εικόνα 6. Χρήσεις γης ΥΔ Θεσσαλίας. ΠΗΓΗ: 1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας, 2017)

Οι χρήσεις νερού διακρίνονται στην ύδρευση και τον τουρισμό, που αφορούν πόσιμο νερό, την άρδευση, την κτηνοτροφία και τη βιομηχανία. Στη Θεσσαλία, η βασικά και σημαντικότερη χρήση νερού αντιστοιχεί στις αρδεύσεις και, κατά δεύτερο λόγο, στο πόσιμο νερό. Οι ζητήσεις της βιομηχανίας και τις κτηνοτροφίας είναι πολύ μικρότερες.

Πίνακας 2. Κατανομή ζήτησης ανά χρήση ύδατος ΥΔ Θεσσαλίας (Πηγή: 1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας)

Χρήση Ύδατος	Ετήσια ζήτηση σε hm ³
Άρδευση για το σύνολο των αρδεύσιμων εκτάσεων	2313
Άρδευση για τις εκτάσεις που αρδεύτηκαν το 2013	1306
Πόσιμο νερό (ύδρευση και τουρισμός)	94
Κτηνοτροφία	13
Βιομηχανία	9

Αναφορικά με την άρδευση, παρουσιάζονται δύο μεγέθη. Το πρώτο αφορά τις δηλωμένες αρδευσιμες εκτάσεις, και απεικονίζει τη μέγιστη αρδευτική ζήτηση. Το δεύτερο αντιστοιχεί στις εκτάσεις και καλλιέργειες που δηλώθηκε ότι αρδεύτηκαν το 2013.

Η Θεσσαλική πεδιάδα επιλέχθηκε ως μια από τις τρεις περιπτώσεις μελέτης λόγω της σημασίας της για την ελληνική γεωργία και οικονομία. Βρίσκεται στην κεντρική Ελλάδα, στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού, τη μεγαλύτερη λεκάνη απορροής ποταμού στην Ελλάδα με έκταση 10700 km² με μέση ετήσια βροχόπτωση 779 mm και μέση ετήσια απορροή 3500 hm³. Αποτελεί μια περιοχή με έντονη γεωργική δραστηριότητα, όπου η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Οι μετεωρολογικοί σταθμοί σε ορισμένες τοποθεσίες της περιοχής είναι σχετικά αξιόπιστοι για την παροχή των μετεωρολογικών μετρήσεων που απαιτούνται για τους υπολογισμούς των παραμέτρων του μοντέλου που απαιτούνται από τη μέθοδο PM-FAO56.

Η περιφερειακή Ενότητα της Λάρισας αποτελεί το μεγαλύτερο καταναλωτή αρδευτικού νερού της Θεσσαλίας. Έχει σε μήκος τα περισσότερα ποτάμια στη Θεσσαλία που εμφανίζουν σημαντική μειωμένη ροή λόγω απολήψεων κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Εκτιμάται ότι οι ποταμοί υφίστανται μία μέτρια απόληψη, περίπου δηλαδή ποσότητα ίση ή ελαφρώς μεγαλύτερη από το 1/3 της ροής του ποταμού ιδίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούλιος – Σεπτέμβριος), (1^η Αναθεώρηση του ΣΔΛΑΠ, 2017).

3.1.2. Υδατικό Διαμέρισμα Θράκης – EL12

Το Υδατικό της Θράκης (EL12) αποτελείται από πέντε λεκάνες απορροής, του Νέστου, των Ρεμάτων Ξάνθης – Ξηρορέματος, των Ρεμάτων Κομοτηνής – Λουτρού Έβρου, του Έβρου και της Θάσου – Σαμοθράκης. Η Κομοτηνή είναι μία από τις πέντε (5) Λεκάνες Απορροής Ποταμού (ΛΑΠ). Η ΛΑΠ της Κομοτηνής και τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον ακόλουθο **Error! Reference source not found.** Περιλαμβάνει τις υπολεκάνες απορροής του ποταμού Λίσσου και του Βοσβόζη η οποία περιλαμβάνει τη λίμνη Ισμαρίδα. Ακόμη περιλαμβάνει ορισμένα μικρότερα υδατορέματα που αποστραγγίζουν στις νότιες παραλιακές περιοχές.

Πίνακας 3. Λεκάνη Απορροής Ποταμού ΥΔ Θράκης, ΛΑΠ Κομοτηνής (ΠΗΓΗ: 1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θράκης (EL12))

Κωδικός ΛΑΠ	Όνομα ΛΑΠ	Έκταση (km ²)	Υψόμετρο (m)		
			Ελάχιστο	Μέσο	Μέγιστο
EL1209	Ρ. Κομοτηνής – Λουτρού Έβρου	1.958,4	0	289	1459

Το Υδατικό Διαμέρισμα της Θράκης έχει έκταση 11.243 km² , από τα οποία τα 564 km² ανήκουν στα νησιά Θάσο και Σαμοθράκη. Περιλαμβάνει το σύνολο των Νομών Έβρου, Ροδόπης, Ξάνθης και τμήματα των Νομών Καβάλας και Δράμας.



Εικόνα 7. Υδατικό Διαμέρισμα Θράκης και οι λεκάνες απορροής του. (ΠΗΓΗ: 1^η Αναθεώρηση του σχεδίου διαχείρισης λεκανών απορροή ποταμών του ΥΔ Θράκης EL12)

Η ετήσια βροχόπτωση κυμαίνεται στα παράλια και στο νησιωτικό τμήμα μεταξύ 500 και 600 mm, στο εσωτερικό μεταξύ 600 και 1000 mm, ενώ στα βόρεια ορεινά ξεπερνά τα 1000 mm. Η μέση ετήσια θερμοκρασία του διαμερίσματος είναι 14.5-16.5 °C ενώ το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος ξεπερνά τους 20°C.

Στο ΥΔ Θράκης περιλαμβάνεται μόνο μία φυσική λίμνη, η λίμνη Ισμαρίδα και έχει συνολικά 5 ταμιευτήρες. Οι σημαντικότεροι ταμιευτήρες είναι αυτοί του Θησαυρού και της Πλατανόβρυσης επί του ποταμού Νέστου, οι οποίοι τροφοδοτούν αντίστοιχα υδροηλεκτρικά έργα της ΔΕΗ. Οι λοιποί ταμιευτήρες χρησιμοποιούνται για ψύξη του ΑΗΣ Κομοτηνής και άρδευση (Γρανινής), ύδρευση (Αισύμης) και άρδευση (Ν. Αδριανής).

Αναφορικά με τις χρήσεις γης του ΥΔ Θράκης και σύμφωνα με την χαρτογραφική αποτύπωση του ΟΠΕΚΕΠΕ (2015-2016) στην ΛΑΠ Κομοτηνής – Λουτρού Έβρου οι καλλιέργειες καταλαμβάνουν ένα σημαντικό ποσοστό του συνόλου (39.49%), ακολουθούν τα δάση και οι δασικές εκτάσεις (35.75%) και οι βοσκότοποι με 19.83%).

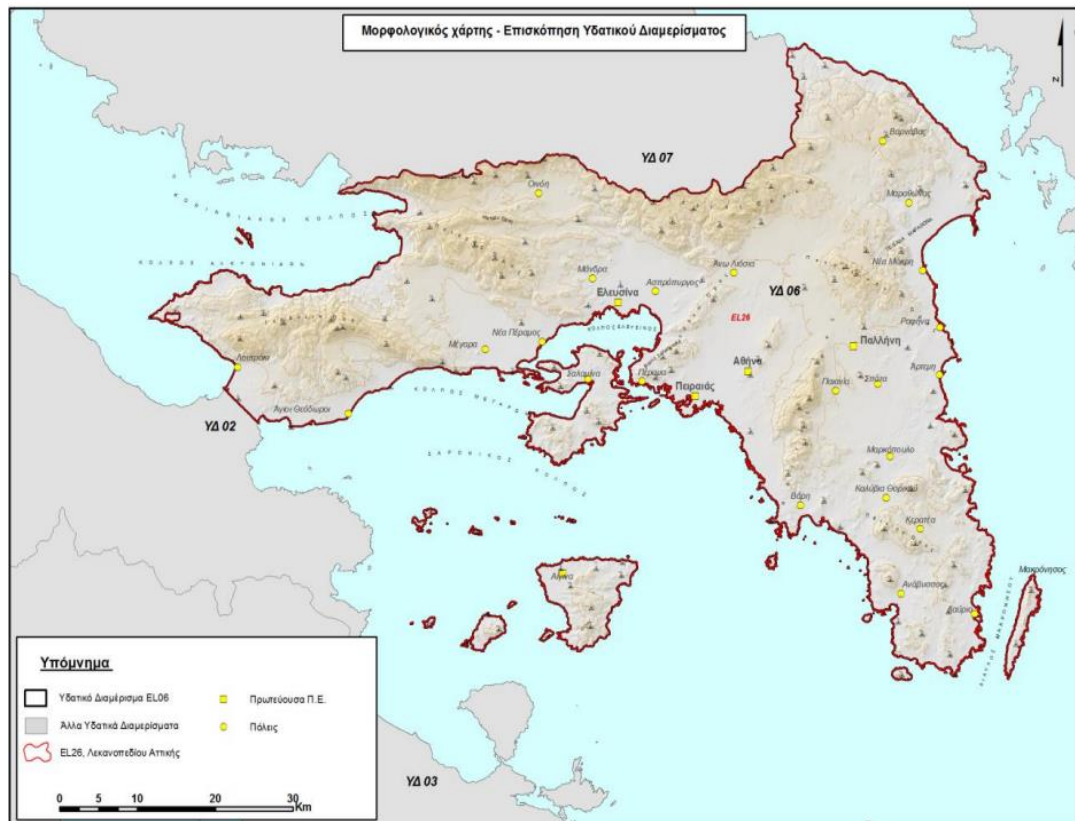
Η κυριότερη χρήση νερού στο ΥΔ Θράκης είναι η αρδευτική. Σημαντική είναι επίσης η ζήτηση για την υδροηλεκτρική παραγωγή. Δευτερεύουσες, από την άποψη των ποσοτήτων, ζητήσεις δημιουργούνται στην ύδρευση και τη βιομηχανία, ενώ μικρή είναι η συμμετοχή στην συνολική ζήτηση της κτηνοτροφίας και του τουρισμού. Υπάρχει ακόμα και μια ζήτηση νερού για την διατήρηση του περιβάλλοντος και των οικοσυστημάτων, ιδιαίτερα στην εκβολή των π. Νέστου και Έβρου αλλά και για την διατήρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών (κυρίως της αλατότητας) των πολυάριθμων μεταβατικών υδάτων (λιμνοθαλασσών) του ΥΔ σε επιθυμητά για τα οικοσυστήματα που υποστηρίζουν επίπεδα. Η μεγαλύτερη ζήτηση νερού στο ΥΔ προέρχεται από την αρδευόμενη γεωργία, όπως προαναφέρθηκε, η οποία ανέρχεται σε 792.1 106 m³ (54.8 %).

Η γεωργία χρησιμοποιεί το 28% της συνολικής έκτασης του ΥΔ Θράκης (πάνω από 3000 km²), από τα οποία αρδεύεται το 44%. Η συντριπτική πλειοψηφία των γεωργικών γαιών αφορά σε αροτραίες καλλιέργειες (93.7%). Οι δενδροκαλλιέργειες ανέρχεται στο 6% της γεωργικής

γης και οι αμπελώνες στο 0.3%. Όσον αφορά τις αροτραίες καλλιέργειες, οι μεγαλύτερες εκτάσεις σχετίζονται με την καλλιέργεια σιτηρών, βαμβακιού και αραβόσιτου. Η πιο σημαντική καλλιέργεια κηπευτικών είναι τα σπαράγγια. Η πιο σημαντική δενδροκαλλιέργεια είναι οι ελαιώνες.

3.1.3. Υδατικό διαμέρισμα Αττικής – ELO6

Το Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής αποτελείται από τη Λεκάνη Απορροής του Λεκανοπεδίου (EL26), η οποία περιλαμβάνει τα νησιά Σαλαμίνα, Αίγινα, Αγκίστρι και Μακρόνησο.



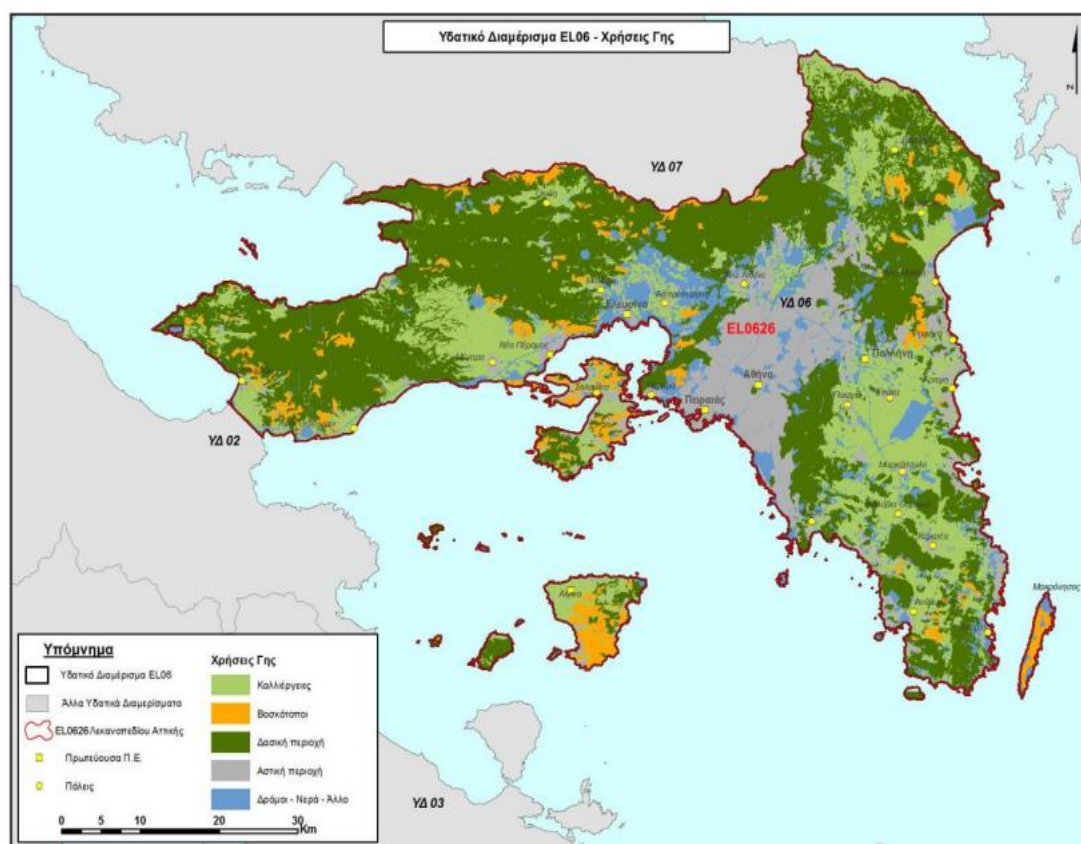
Εικόνα 8. Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής [ΠΗΓΗ: 1^η Αναθεώρηση του σχεδίου διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών του ΥΔ Αττικής ELO6]

Η γεωμορφολογική εικόνα που παρουσιάζει το διαμέρισμα χαρακτηρίζεται από ποικιλομορφία ανάγλυφου. Περιλαμβάνονται τέσσερα βουνά με υψόμετρο πάνω από τα 1.000 m (Πάρνηθα, Κιθαιρώνας, Πεντέλη και Υμηττός), ενώ οι περισσότερες πεδινές εκτάσεις βρίσκονται στην παράκτια ζώνη. Το Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής αναπτύσσεται σε περιοχή με πολυσχιδές ανάγλυφο που χαρακτηρίζεται από επιμήκους ανάπτυξης και μεταβαλλόμενης διεύθυνσης ορεινές μάζες, που διακρίνονται από ενδιάμεσες πεδινές λεκάνες. Στο βόρειο και δυτικό τμήμα της περιοχής ορθώνονται οι ορεινοί όγκοι Πάρνηθας, Κιθαιρώνα, Πατέρα και Γερανείων που εκτείνονται κυρίως με διεύθυνση Α-Δ. Στο ανατολικό τμήμα αναπτύσσεται στα βόρεια η Πεντέλη με τα βουνά Γραμματικού – Μαραθώνα και οι ορεινές μάζες Υμηττού και Λαυρεωτικής. Η Πεντέλη έχει περίπου κυκλική ανάπτυξη ενώ στον Υμηττό και τη Λαυρεωτική οι ορογραφικοί άξονες είναι από Βορρά προς Νότο. Στο μέσον της περιοχής εκτείνεται η λεκάνη του Κηφισού που διαρρέεται από τον ομώνυμο ποταμό με κατεύθυνση από ΒΒΑ προς ΝΝΔ. Στο ανατολικό τμήμα υπάρχει ακόμα η εσωτερική λεκάνη

των Μεσογείων με την παράκτια ζώνη Μαραθώνα – Νέας Μάκρης, ενώ στα δυτικά οι λεκάνες Θριάσιου πεδίου και Μεγάρων.

Το κλίμα χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό, με εξαίρεση τα υψηλά σημεία, όπου το κλίμα είναι ορεινό. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 350 mm στο λεκανοπέδιο Αττικής μέχρι 1000 mm στα ορεινά τμήματα. Οι μέρες βροχής κυμαίνονται από 50 μέχρι 100 το χρόνο. Η χιονόπτωση είναι συχνή στις ορεινές περιοχές, ενώ στις παράκτιες χιονίζει σπάνια. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16°C έως 18°C, ανάλογα με το υψόμετρο και την απόσταση από τη θάλασσα, ενώ το ετήσιο θερμομετρικό εύρος είναι 16°C.

Οι χρήσεις γης του Υδατικού Διαμερίσματος, όπως έχουν προκύψει από το Σύστημα Αγροτεμαχίων του ΟΠΕΚΕΠΕ παρουσιάζουν την εξής κατανομή.



Εικόνα 9. Χρήσης γης στο Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής. [ΠΗΓΗ: 1^η Αναθεώρηση του σχεδίου διαχείρισης λεκανών απορροής ποταμών του ΥΔ Αττικής EL06]

Στο ΥΔ της Αττικής, πέρα από την εκτεταμένη αστική χρήση που καταλαμβάνει το 14%, υπάρχουν σημαντικές δασικές και ημιδασικές εκτάσεις σε ποσοστό 46%, καθώς και εκτάσεις καλλιεργειών που καλύπτουν το 24%.

Αναφορικά με τις κύριες χρήσεις του νερού, εκτιμάται ότι οι συνολικές απολήψιμες ποσότητες αρδευτικού νερού φτάνουν τα 66681.998 m³, ποσοστό 13.2%.

Η πεδιάδα του Μαραθώνα χαρακτηρίζεται από έντονη αγροτική δραστηριότητα, καθώς και από οικιστική ανάπτυξη κυρίως τα τελευταία χρόνια. Το μεγαλύτερο μέρος της πεδιάδας καλύπτεται από καλλιέργειες, με την καλλιεργήσιμη έκταση να φτάνει τα 17 km²

Οι κυριότερες χρήσεις γης που συναντά κανείς στην πεδιάδα του Μαραθώνα καθώς οι αλλαγές που έχουν προκύψει στη διάρκεια του τελευταίου αιώνα παρουσιάζονται στη συγκριτική μελέτη των Ξανθάκη και Ξανθόπουλου (2007).

Πίνακας 4 Έκταση και ποσοστό χρήσεων γης και τα έτη 1880, 1988 και 2000 (Πηγή: Ξανθάκης και Ξανθόπουλος, 2007)

Χρήσεις Γης	1880	%	1988	%	2000	%
Υγρότοποι	8.57	4.84	9.88	5.57	6,18	3.49
Οικισμοί	2.24	1.26	14.95	8.44	17.58	9.92
Καλλιέργειες	3.77	2.13	52.08	29.39	55.54	31.34
Δάση – Ημιφυσικές περιοχές	162.64	91.77	100.31	56.60	97.92	55.25
Σύνολο	177.22	100	177.22	100	177.22	100

Παρατηρείται ότι τη 12ετία, μέχρι δηλαδή το τέλος του 2000, μια ραγδαία μείωση της δασικής έκτασης και λιγότερο των υγροτόπων, προς όφελος της οικιστικής ανάπτυξης και των καλλιεργειών.

Το έτος 2000 βάσει της αξιολόγησης του προγράμματος Corine, οι καλλιέργειες καλύπτουν το 31% των εκτάσεων της πεδιάδας. Παράλληλα, οι οικισμοί που το 1880 καταλάμβαναν μόλις το 1,3% της πεδιάδας, σήμερα αγγίζουν το 10% της συνολικής έκτασης. Οι αυξημένες ανάγκες των καλλιεργειών σε νερό έχουν ως αποτέλεσμα την πλήρη εκμετάλλευση των μικρών ποσοτήτων απορροής προς την πεδιάδα και την υπεράντληση από τον υδροφόρο ορίζοντα. Σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει, ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας στον όρμο του Μαραθώνα αντιμετωπίζει προβλήματα λόγω της υπεράντλησης των υδάτων του από τους αγρότες της περιοχής. Η απότομη αυτή αύξηση των αναγκών σε νερό πρωτίστως για την άρδευση των καλλιεργειών και δευτερευόντως για την ύδρευση των κατοίκων, σε συνδυασμό με την κατασκευή και λειτουργία του φράγματος την ίδια χρονική περίοδο έχει συντελέσει στη μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα με ενδεχόμενες καταστροφικές συνέπειες για την περιοχή.

3.2. Μετεωρολογικά δεδομένα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_o προήλθαν τόσο επίγεια όσο και επανάλυσης ERA5-Land μετεωρολογικά δεδομένα από τις περιοχές της Λάρισας, της Κομοτηνής και του Μαραθώνα. Στον Πίνακα 5 αναγράφονται οι χρονικές περιόδους για τις οποίες υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα θερμοκρασίας (T), σχετικής υγρασίας (RH), ταχύτητας του ανέμου (u), ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (Rs) και βροχόπτωσης (P).

Πίνακας 5. Μετεωρολογικοί σταθμοί GAIAtrop και οι αντίστοιχες χρονικές περιόδους που χρησιμοποιήθηκαν.

Σταθμός	Χρονική Περίοδος
Λάρισα_13	30/5/2019 – 31/12/2021
Κομοτηνή_5.1	1/7/2020 – 31/12/2020
Κομοτηνή_6.1	26/6/2020 – 31/12/2020
Μαραθώνας_3	26/1/2021 – 4/6/2021

Τα επίγεια δεδομένα προήλθαν από τους αγρομετεωρολογικούς σταθμούς GAIAtrop της εταιρίας NEUROPUBLIC A.E. και παραχωρήθηκαν επεξεργασμένα από το τμήμα “Τμήμα Επιστήμης & Ανάλυσης Δεδομένων” της ίδιας εταιρίας, ενώ τα δεδομένα επανάλυσης ERA5-Land είναι διαθέσιμα μέσω της ιστοσελίδας <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.

3.2.1. Επίγεια Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα προήλθαν από το δίκτυο Αγρομετεωρολογικών Σταθμών της εταιρίας NEUROPUBLIC A.E. και συγκεκριμένα από έναν σταθμό στην περιοχή της Λάρισας, δύο σταθμούς στην Κομοτηνή και έναν σταθμό στον Μαραθώνα. Από τους σταθμούς αυτούς χορηγήθηκαν ωριαία δεδομένα, από τα οποία προέκυψαν οι ημερήσιες τιμές των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των ημερήσιων τιμών ET_o.

Πίνακας 6. Οι σταθμοί GAIAtrop που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ET_o και τα διάφορα χαρακτηριστικά στοιχεία τους.

a/a	Όνομα Σταθμού	Γεωγραφικό Πλάτος (ψ)	Γεωγραφικό Μήκος (χ)	Υψόμετρο Σταθμού (m)
1	Λάρισα 13	39.5988	22.5712	61
2	Κομοτηνή 5.1	40.9101	25.4608	46
3	Κομοτηνή 6.1	41.1102	25.5068	82
4	Μαραθώνας 3	38.1617	24.0070	6

Τα δεδομένα που χορηγήθηκαν από την εταιρία είχαν αξιολογηθεί ποιοτικά και “καθαριστεί” από το τμήμα “Τμήμα Επιστήμης & Ανάλυσης Δεδομένων” της εταιρίας.



Εικόνα 10. Απεικόνιση των θέσεων των αγρομετεωρολογικών σταθμών GAIAtron στον Ελλαδικό χώρο.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι χρονικές περίοδοι που ήταν διαθέσιμες δεν αποτελούν ικανοποιητικό δείγμα για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Οι τηλεμετρικοί σταθμοί της εταιρίας πολλές φορές αφαιρούνται από το αγροτεμάχιο μετά το πέρας της καλλιεργητικής περιόδου.

3.2.1.1. Αγρομετεωρολογικοί σταθμοί – GAIAtron NEUROPUBLIC A.E. – Τεχνική περιγραφή

Οι GAIAtrons, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν από τη εταιρεία NEUROPUBLIC A.E., είναι αγροκλιματικοί σταθμοί αισθητήρων IoT, οι οποίοι συμμετέχουν σε μια σειρά από πιλοτικά προγράμματα για τη γεωργία και παρέχουν κρίσιμες επιτόπιες πληροφορίες.

Ο σταθμός GAIAtron είναι μια πλατφόρμα IoT που ενσωματώνει μια μεγάλη ποικιλία αισθητήρων που προορίζονται για τη συνεχή παρακολούθηση των μεταβλητών του περιβάλλοντος της καλλιέργειας σε επιλεγμένες γεωργικές περιοχές. Σχεδιάζεται εσωτερικά, κατασκευάζεται από εξειδικευμένους εξωτερικούς συνεργάτες και εγκαθίσταται από ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό της εταιρίας. Μέχρι στιγμής, έχει παραχθεί σε δύο (2) τύπους προκειμένου να φιλοξενήσει το προφίλ αισθητήρων που απαιτείται για κάθε σενάριο εγκατάστασης. Ένας τρίτος τύπος που συνδυάζει τα προφίλ αισθητήρων και των άλλων δύο τύπων, έχει περάσει στο στάδιο παραγωγής. Συνοπτικά, οι τύποι αυτοί είναι οι εξής:

1. **GAIAtron Atmo**, που επικεντρώνεται σε ατμοσφαιρικές και ηλιακές μετρήσεις
2. **GAIAtron Soil**, που επικεντρώνεται σε μετρήσεις σχετικά με τις εδαφικές παραμέτρους της κάθε καλλιέργειας

3. **GAIAttron Soil/Atmo**, που συνδυάζει και τους δύο προαναφερθέντες τύπους. Ο τύπος που επιλέγεται για κάθε εγκατάσταση εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες των δεδομένων που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση.

Κατασκευή

Η κύρια μεθοδολογία κατασκευής όλων των τύπων των σταθμών GAIAttron αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- Εντοπισμός των προδιαγραφών δεδομένων (από γεωπόνους και γεωπόνους μηχανικούς)
- Ανάλυση των προδιαγραφών και σκιαγράφηση των απαιτήσεων
- Δημιουργία πρωτοτύπων (υλικό/λογισμικό)
- Δοκιμές μονάδας/ ενσωμάτωσης/ λειτουργίας και παλινδρόμησης.
- Ελεγχόμενη εγκατάσταση δοκιμών (βήμα επιτυχίας/αποτυχίας, σε περίπτωση αποτυχίας η διαδικασία μεταβαίνει στην "Δημιουργία πρωτοτύπων")
- Κατασκευή PCB (προμηθευτές με έδρα την ΕΕ, συμμόρφωση με ROHS 2011/65/EC).
- Κατασκευή καλωδίων (εργολάβοι με έδρα την ΕΕ).
- Παραγγελία εξαρτημάτων, τοποθέτηση PCB, τελική συναρμολόγηση και Ποιοτικός έλεγχος (εκτελείται από ειδικευμένους εργολάβους με έδρα την ΕΕ - συμμόρφωση με RoHS 2011/65/EE-RoHS 2.0).
- Εγκατάσταση.

Προδιαγραφές Υλικού

Όλα τα διακριτά εξαρτήματα του σταθμού GAIAttron πληρούν απαραίτητες προδιαγραφές όσον αφορά την αντοχή στους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Ο σταθμός έχει σχεδιαστεί για να εγκαθίσταται δίπλα ή/και μέσα σε καλλιεργούμενα χωράφια και να παραμένει εκεί για χρόνια, με ελάχιστη ή αν είναι δυνατόν καθόλου συντήρηση. Αναφορικά με τις καιρικές και άλλες εξωτερικές συνθήκες, όλα τα εκτεθειμένα μέρη είναι σε θέση να αντέξουν σε:

- Θερμοκρασίες που κυμαίνονται από -20 έως 60 °C.
- Έκθεση στο άμεσο ηλιακό φως για παρατεταμένες χρονικές περιόδους, περίπου 10 χρόνια (αντοχή στην υπεριώδη ακτονοβολία)
- Παρατεταμένη λειτουργία υπό υψηλή ατμοσφαιρική υγρασία (100%)
- Ακραίες βροχοπτώσεις
- Χαλάζι
- Υψηλές ταχύτητες ανέμου έως 120Km/h (10bft)

Πιο αναλυτική περιγραφή για τον σταθμό GAIAttron Soil & Atmo:

Ο GAIAttron Soil & Atmo αποτελείται από οκτώ (8) διακριτά μέρη ή ομάδες μερών

1. Την κεφαλή του μετεωρολογικού σταθμού που μετρά τα χρήσιμα περιβαλλοντικά δεδομένα
2. Το κύριο περίβλημα που στεγάζει την είσοδο/έξοδο, την μπαταρία και τον ηλιακό φορτιστή
3. Την/τις περιφερειακή/ές μονάδα/ες αισθητήρα/ες υγρασίας φύλλων

4. Τον περιφερειακό αισθητήρα εδάφους - τύπου I (Davis WATERMARK), τύπου II (Sentek EnviroSCAN) ή και τα δύο
5. Η μπαταρία που καλύπτει τις ηλεκτρικές απαιτήσεις του σταθμού
6. Το ηλιακό πάνελ και ο φορτιστής που προσφέρουν την απαραίτητη ενέργεια για την αναπλήρωση της μπαταρίας
7. Ο ιστός που υποστηρίζει το σύνολο της προαναφερθείσας εγκατάστασης
8. Η βάση που σταθεροποιεί τον ιστό

Οι τυπικοί αισθητήρες του σταθμού GAIatron Soil & Atmo Station περιγράφονται στον ακόλουθο κατάλογο:

Πίνακας 7. Περιγραφή των τυπικών αισθητήρων του σταθμού GAIatron soil & Atmo Station.

Όνομα Αισθητήρα	Μεταβλητές και Μονάδες μέτρησης
SHT31	Θερμοκρασία (°C), Σχετική υγρασία (%)
LPS33HW	Βαρομετρική πίεση (mBar)
CYL49E Hall Effect Sensor	Διεύθυνση ανέμου (°)
Συλλέκτης βροχής (Auto Emptying)	(0.2 mm increments)
Wind cups with Reed Switch	Ταχύτητα ανέμου (km/h)
Περιφερειακός αισθητήρας διύγρυνσης φύλλου (Peripheral Leaf Wetness Sensor)	Binary (wet/dry)
SHT31 - Remote (on Leaf Wetness PCB)	Θερμοκρασία (C°), Σχετική υγρασία (%)
TEPT5700	Αισθητήρας ηλιακού φωτός (W/m ²)
Περιφερειακός αισθητήρας εδάφους – Type II (Sentek EnviroSCAN)	Εδαφική υγρασία (%), Αλατότητα/Αγωγιμότητα (dS/m), θερμοκρασία (°C)

Η “κεφαλή” του μετεωρολογικού σταθμού:

- Όλες οι οπές και τα ανοίγματα (οπές εξαερισμού/αποχέτευσης, είσοδος βροχομέτρου κ.λπ.) προστατεύονται από πιθανές προσβολές εντόμων.
- Η είσοδος του βροχομέτρου προστατεύεται από τη συσσώρευση σκουπιδιών στο εσωτερικό του σταθμού και στην ίδια την είσοδο του βροχομέτρου.
- Περιλαμβάνει υποδοχή για αισθητήρα ηλιακού φωτός για σκοπούς μέτρησης του ηλιακού φωτός.
- Επιτρέπει την τοποθέτηση δύο εξωτερικών κεραιών για τις ανάγκες των μονάδων UHF και GSM/3G (η απόσταση μεταξύ των κεραιών διαστασιολογείται με γνώμονα την εξάλειψη των διασταυρούμενων παρεμβολών RF).
- Δυνατότητα φιλοξενίας μιας πλακέτας μεγέθους 50x50 mm με την απαραίτητη έκθεση για τη δειγματοληψία ατμοσφαιρικών παραμέτρων.
- Το πλαστικό περίβλημα του μετεωρολογικού σταθμού μπορεί να φιλοξενήσει τα ακόλουθα περιφερειακά:
 - πτερύγιο κατεύθυνσης ανέμου
 - Ανεμόμετρο με περιστρεφόμενες κούπες (αισθητήρας ταχύτητας ανέμου)
 - Μικρό φωτοβολταϊκό πάνελ για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας
 - Κουμπί πίεσης, για χειροκίνητη επαναφορά
 - Εξωτερικός αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας, εντός προστατευτικού περιβλήματος
 - Βροχόμετρο τύπου ανατρεπόμενου κάδου

- Κλινόμετρο φυσαλίδας, για σωστή εγκατάσταση κλίσης

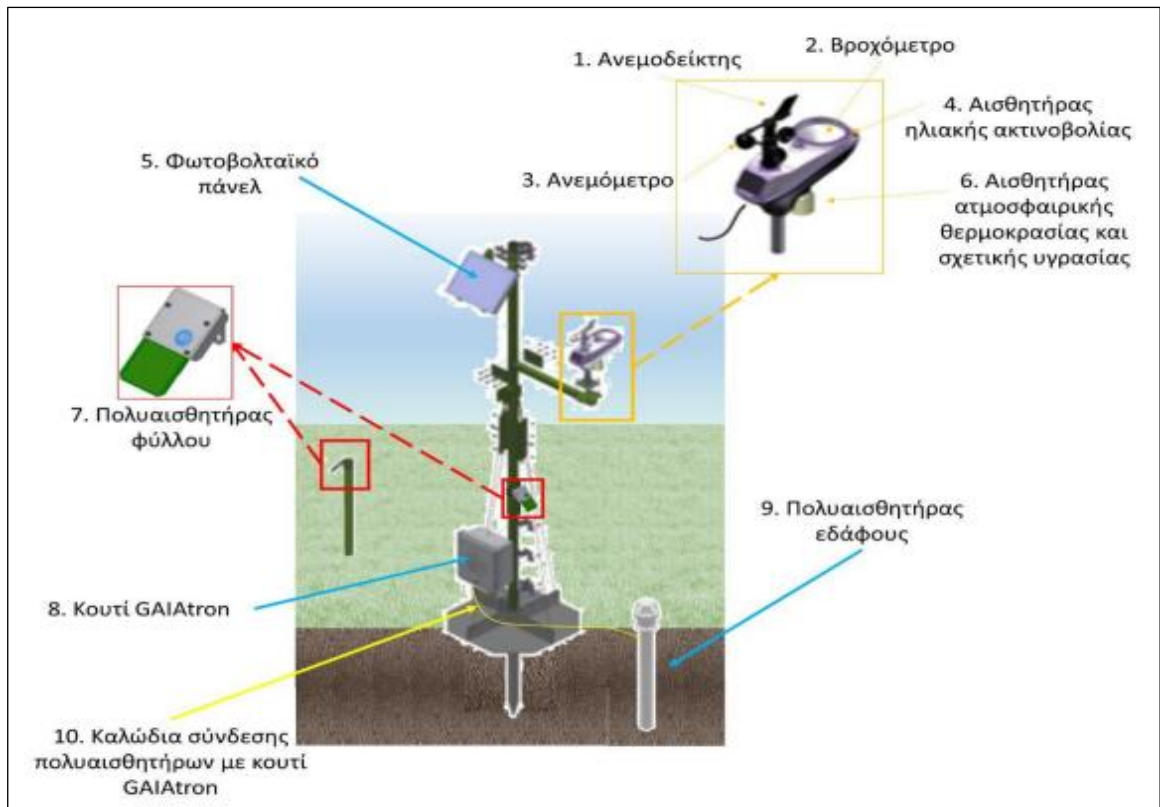
Το κύριο Περιβλήμα

- Εξασφαλίζει εύκολη πρόσβαση χωρίς να διακυβεύεται η αδιαβροχοποίηση.
- Έξι αδιάβροχα ανοίγματα / στόμια.
- Ενδεικτικός τύπος μπαταρίας: 12V, 12Ah, VRLA battery, 151 x 98 x 97.5mm, 4.1 kg

Κοινά Στοιχεία όλων των τύπων σταθμών

Τα κοινά μέρη και των τριών τύπων σταθμών GAIAtrop είναι τα εξής

1. Η μπαταρία
 - Μπαταρία 12V, 12Ah, VRLA, 151 x 98 x 97.5 mm, 4.1 kg. Διαστασιολογείται με στόχο να μπορεί να συντηρεί το σύστημα χωρίς επαναφόρτιση, διατηρώντας παράλληλα τη λειτουργική του ακεραιότητα (χωρίς βαθιά εκφόρτιση) για περίοδο όχι μικρότερη από 5 ημέρες αδιάλειπτης λειτουργίας.
 - Non-Spillable
 - Ανακυκλώσιμη
2. Το ηλιακό πάνελ και ο φορτιστής
 - Δυνατότητα φόρτισης της μπαταρίας ακόμη και σε συνθήκες περιορισμένου ηλιακού φωτός. Μια πλήρης ημέρα φόρτισης μπορεί να παρέχει ηλεκτρική τροφοδοσία για ολόκληρο το σύστημα για περίοδο όχι μικρότερη από 5 ημέρες αδιάλειπτης λειτουργίας, εξαρτώμενη αποκλειστικά από την μπαταρία.
 - Διαστασιολογείται αναλόγως ώστε να αντέχει σε πολύ περιορισμένη φόρτιση λόγω επίμονης συννεφιάς το χειμώνα για έως και μία εβδομάδα, ενώ μπορεί να ανακάμψει.
3. Ο ιστός
 - Δυνατότητα ανύψωσης του μετεωρολογικού σταθμού σε ύψος 3,5 μέτρων από το επίπεδο του εδάφους ή σε ύψος 1.5 μέτρων.
 - Το ύψος του φωτοβολταϊκού πλαισίου μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 1.2 και 2.5 μέτρων.
4. Η βάση



Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση των επιμέρους στοιχείων του σταθμού.

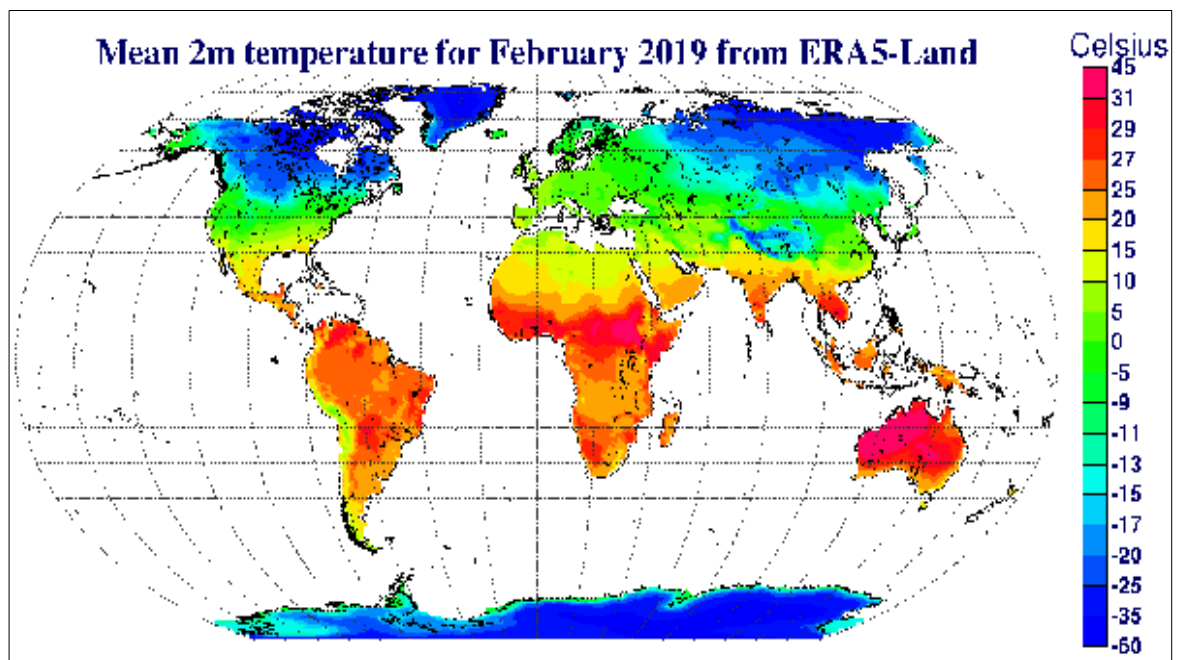
3.2.2. ERA5- Land - Μετεωρολογικά Δεδομένα Επανάλυσης

Τα μετεωρολογικά δεδομένα του ERA5-Land (ERA5L) αποτελούν ένα σύνολο δεδομένων επανάλυσης και παρέχουν μια συνεπή εικόνα της εξέλιξης των μεταβλητών της γης εδώ και αρκετές δεκαετίες με αυξημένη ανάλυση σε σύγκριση με το ERA5. Το ERA5-Land έχει παραχθεί με την αναπαραγωγή του εδαφικού τμήματος της κλιματικής επανάλυσης ERA5 του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμων Μετεωρολογικών Προβλέψεων ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Η επανάλυση συνδυάζει δεδομένα μοντέλων με παρατηρήσεις από όλο τον κόσμο σε ένα πλήρες και με συνοχή παγκόσμιο σύνολο δεδομένων, χρησιμοποιώντας τους νόμους της φυσικής. Η επανάλυση παράγει δεδομένα που πηγαίνουν πίσω στο χρόνο αρκετές δεκαετίες, παρέχοντας έτσι μια ακριβή περιγραφή του κλίματος στο παρελθόν.

Το ERA5L χρησιμοποιεί ως είσοδο για τον έλεγχο των προσομοιωμένων εδαφικών πεδίων μεταβλητές από τον ERA5, όπως είναι η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα. Αυτό ονομάζεται ατμοσφαιρική ώθηση. Χωρίς τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ώθησης, οι εκτιμήσεις που βασίζονται στο μοντέλο μπορούν να αποκλίνουν γρήγορα από τη πραγματικότητα. Επομένως, ενώ οι παρατηρήσεις δεν χρησιμοποιούνται άμεσα στην παραγωγή στην παραγωγή του ERA5L, έχουν έμμεση επιρροή μέσω της ατμοσφαιρικής επιβολής που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Επιπλέον, η εισαγωγή της θερμοκρασία του αέρα, της ατμοσφαιρικής υγρασίας και της πίεσης που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση του ERA5-Land διορθώνονται ώστε να ληφθεί υπόψη η υψομετρική διαφορά μεταξύ του πλέγματος της επιβολής και του υψηλότερης ανάλυσης πλέγματος του ERA5L.

Το σύνολο μετεωρολογικών δεδομένων του ERA5-Land, όπως και κάθε άλλη προσομοίωση, παρέχει εκτιμήσεις που σε κάποιο βαθμό εμπεριέχουν αβεβαιότητα. Τα αριθμητικά μοντέλα μπορούν μόνο να παρέχουν μια περισσότερο ή λιγότερο ακριβή αναπαράσταση των πραγματικών φυσικών διεργασιών που διέπουν τα διάφορα στοιχεία του Συστήματος της Γης. Γενικά, η αβεβαιότητα των εκτιμήσεων των μοντέλων αυξάνεται όσο πηγαίνουμε πίσω στον χρόνο, επειδή ο αριθμός των διαθέσιμων παρατηρήσεων για τη δημιουργία μιας καλής ποιοτικά ατμοσφαιρικής ώθησης είναι μικρότερος. Τα πεδία παραμέτρων του ERA5 μπορούν επί του παρόντος να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με την αβεβαιότητα των αντίστοιχων πεδίων του ERA5.

Οι χρονικές και χωρικές αναλύσεις του ERA5L καθιστούν αυτό το σύνολο δεδομένων πολύ χρήσιμο για κάθε είδους εφαρμογές στην επιφάνεια, όπως η πρόβλεψη πλημμυρών ή ξηρασίας. Η χρονική και χωρική ανάλυση αυτού του συνόλου δεδομένων, η χρονική περίοδος που καλύπτεται, καθώς και το σταθερό πλέγμα που χρησιμοποιείται για τη διανομή των δεδομένων σε οποιαδήποτε περίοδο, επιτρέπει στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, τις επιχειρήσεις και τους ιδιώτες να έχουν πρόσβαση και να χρησιμοποιούν ακριβέστερες με την κατάσταση της επιφάνειας της Γης.



Εικόνα 12. Απεικόνιση της μέσης θερμοκρασίας του αέρα στα 2m από τον ERA5-Land τον Φεβρουάριο του 2019. ΠΗΓΗ: Copernicus Products, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.e2161bac?tab=overview>

Το ERA5-Land είναι μια επανάληψη της συνιστώσας της ξηράς του ERA5 κλιματικής επανάλυσης (climate reanalysis), που τροφοδοτείται από μετεωρολογικά πεδία του ERA5. Σημειώνεται ότι ο ERA5 Land χρησιμοποιεί πάντα πεδία δυνάμεων (forcing fields) που βασίζονται στην τελική έκδοση του ERA5. Το σύνολο των δεδομένων του ERA5L καλύπτουν χρονικά την ίδια περίοδο με τον ERA5, από τον Ιανουάριο του 1950 έως και 2-3 μήνες πριν από το σήμερα.

Το ERA5-Land συνοδεύεται από μία σειρά από βελτιώσεις που τον καθιστούν πιο ακριβή για όλους τους τύπους εφαρμογών της γης. Ειδικότερα ο ERA5-Land λειτουργεί με βελτιωμένη

χωρική ανάλυση 9 km έναντι 31 km του ERA5. Η χρονική ανάλυση του δορυφόρου είναι ωριαία και τα πεδία είναι καλυμμένα για όλους τους ωκεανούς καθιστώντας τα πιο εύχρηστα. Ο ERA5-Land παράγεται στο πλαίσιο μιας ενιαίας προσομοίωσης, χωρίς σύζευξη με την ατμοσφαιρική ενότητα του ολοκληρωμένου συστήματος πρόβλεψης (IFS) του ECMWF ή με το μοντέλο ωκεάνιων κυμάτων του IFS. Τρέχει χωρίς αφομοίωση δεδομένων, καθιστώντας το υπολογιστικά προσιτό για σχετικά γρήγορες ενημερώσεις. Για παράδειγμα, εάν εφαρμοστούν σημαντικές βελτιώσεις του μοντέλου επιφάνειας της γης, το σύνολο ή μέρος του συνόλου δεδομένων μπορεί να επανεπεξεργαστεί σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Επίσης, είναι δυνατή η επικαιροποίηση σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται βελτιωμένα βοηθητικά σύνολα δεδομένων ως είσοδος για την παραγωγή. Οι παρατηρήσεις επηρεάζουν έμμεσα την προσομοίωση μέσω της ατμοσφαιρικής επιβολής του ERA5. Αυτή η ώθηση οδηγεί την ενιαία προσομοίωση ERA5-Land και έχει προκύψει από την αφομοίωση παρατηρήσεων μέσω ενός συστήματος αφομοίωσης δεδομένων 4D-VAR και ενός απλουστευμένου διευρυμένου φίλτρου Kalman.

Τα προϊόντα μετεωρολογικής επανάλυσης παρέχουν ακριβή ανακατασκευή του κλίματος του παρελθόντος, εκτελώντας στο παρελθόν τις πιο προηγμένες και επικαιροποιημένες εκδόσεις των αριθμητικών μοντέλων πρόβλεψης καιρού που υπακούουν σε φυσικούς νόμους, ενώ παράλληλα αφομοιώνουν διαδοχικά παρατηρήσεις της επιφάνειας της γης και της ατμόσφαιρας από όλο τον κόσμο. Τα τελευταία χρόνια, τα προϊόντα αναλύσεων χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως πηγή δεδομένων πλέγματος (gridded data) για μελέτες διαχείρισης υδατικών πόρων, καθώς αντιπροσωπεύουν ένα πλήρες και συνεπές σύνολο κλιματικών δεδομένων που καλύπτει αρκετές δεκαετίες, (Soci et al., 2016).

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούμε τα πιο προηγμένα reanalysis data στην Ευρώπη, ειδικά βελτιστοποιημένα για τις εφαρμογές στην επιφάνεια της: ERA5-Land (ERA5L), τα οποία διατίθενται ελεύθερα στον ιστότοπο (<https://cds.climate.copernicus.eu>).

Τα δεδομένα του ERA5-Land παράγονται με ωριαίο χρονικό βήμα. Έτσι, οι ελάχιστες, μέγιστες και μέσες ημερήσιες τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών προέκυψαν εδώ με τη συλλογή 24 τιμών, ξεκινώντας από την UTC+ 2 κάθε μέρα, για τον υπολογισμό των ημερήσιων τιμών σύμφωνα με τη θερινή ώρα όπως τα δεδομένα καιρού εδάφους. Οι επιλεγμένες μετεωρολογικές μεταβλητές ενδιαφέροντος ήταν η θερμοκρασία του αέρα στα 2 m, η ταχύτητα του ανέμου στα 10 m, η θερμοκρασία σημείου δρόσου στα 2 m, η παγκόσμια εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και η βαρομετρική πίεση. Η ημερήσια μέση θερμοκρασία σημείου δρόσου χρησιμοποιήθηκε στην εξίσωση (2), $e_a = e_0(T_{dew})$, για τον υπολογισμό της ημερήσιας μέσης τιμής της πραγματικής πίεσης υδρατμών, αντί της ημερήσιας μέγιστης και ελάχιστης σχετικής υγρασίας, όπως έγινε για τα επίγεια δεδομένα.

Οι Pelosi κ.α. (Pelosi et al., 2020) έδειξαν ότι η ακρίβεια της ημερήσιας ET_0 που προβλέπεται με το ERA5-Land είναι συγκρίσιμη με εκείνη που προβλέπεται με χωρική παρεμβολή των επίγειων μετεωρολογικών δεδομένων, αλλά επισήμαναν επίσης ότι η εισερχόμενη βραχύβια ηλιακή ακτινοβολία που ανακατασκευάζεται από το ERA5-Land είναι η πιο επιρρεπής σε σφάλματα μεταξύ των εμπλεκόμενων μετεωρολογικών μεταβλητών. Αν και ο ERA5L λειτουργεί με αυξημένη χωρική ανάλυση, έχει το μειονέκτημα ότι δεν παρέχονται δεδομένα για τα σημεία του αριθμητικού πλέγματος που εμπίπτουν στην επιφάνεια της θάλασσας.

Έτσι, για τις χερσαίες περιοχές κοντά στην ακτή, η αξιολόγηση των μετεωρολογικών μεταβλητών πρέπει να βασίζεται μόνο στα πλησιέστερα δεδομένα της ενδοχώρας.

4. Μεθοδολογία

Στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των μεθοδολογικών προσεγγίσεων για την εκτίμηση των ημερήσιων τιμών εξατμισοδιαπνοής. Χρησιμοποιώντας επίγεια και μετεωρολογικά δεδομένα επανάλυσης (ERA5L), υπολογίστηκε η ET_0 με τη μέθοδο FAO-56 PM, αλλά και με τρεις άλλες εμπειρικές μεθόδους (Corais, Valiatzas και Hargreaves-Samani) και πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις με σκοπό να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των μοντέλων. Ως βάση των συγκρίσεων υιοθετήθηκε η μέθοδος FAO-56 PM.

Επιπλέον πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων μεταξύ τους με βάση την πηγή των δεδομένων. Πιο αναλυτικά, για τις μεθόδους υπολογίστηκε ο δείκτης ο δείκτης RMSE, ο συντελεστής συσχέτισης, ο συντελεστής R^2 και η κλίση α από τη γραμμική συσχέτιση. Επιπλέον, για κάθε περιοχή εξετάστηκαν και συγκρίθηκαν με βάση την πηγή δεδομένων, πέντε μετεωρολογικές παράμετροι, η μέγιστη, ελάχιστη και μέση θερμοκρασία αέρα (T_{max} , T_{min} & T_{avg}), η μέση σχετική υγρασία (Rh_{avg}) και η ηλιακή ακτινοβολία (Rs). Για κάθε μία υπολογίστηκε ο συντελεστής R^2 και η κλίση α από τη γραμμική συσχέτιση.

Τέλος, έγινε ανάλυση ευαισθησίας για την κατανόηση και την ανάδειξη της φυσικής σημασίας κάθε παραμέτρου που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς.

4.1. Επεξεργασία και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Για την εκτίμηση, των ημερήσιων τιμών της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0), χρησιμοποιήθηκαν τόσο επίγεια όσο και μετεωρολογικά δεδομένα επανάλυσης από τις περιοχές της Λάρισας, της Κομοτηνής και του Μαραθώνα. Τα επίγεια προήλθαν από τους αγρομετεωρολογικούς σταθμούς GAIATron.

Ο σταθμός GAIATron διαθέτει αυτόματο σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης των δεδομένων, με χρονικό βήμα 10λεπτού. Τα ημερήσια δεδομένα για την παραμέτρους (T , RH , Rs , u) προέκυψαν από την μέση τιμή του 24ωρου, ενώ η T_{max} , T_{min} , RH_{max} και RH_{min} αποδόθηκαν από την μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία και σχετική υγρασία αντίστοιχα από τις καταγραφές του 24ωρου. Την ίδια επεξεργασία έλαβαν και τα δορυφορικά δεδομένα τα οποία προήλθαν από τον δορυφόρο ERA5- Land.

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν αρχικά με τα επίγεια και μετέπειτα με τα δορυφορικά δεδομένα, οι ημερήσιες τιμές της ET_0 . Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο οι εμπειρικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η Hargreaves-Samani (1985), η οποία βασίζεται στην θερμοκρασία, η Corais (Alexandris et al., 2006) και η Valiatzas (Valiatzas, 2013) οι οποίες βασίζονται στην ακτινοβολία.

Η εξίσωση FAO-56 PM για τον υπολογισμό της ET_0 σε ημερήσια βάση έχει τη μορφή της Εξίσωσης 7.

$$ET_0 = \frac{0,4084(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad (7)$$

Πιο αναλυτικά για κάθε παράμετρο της μεθόδου FAO-56 PM.

ET_o : Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς [mm/d], R_n : Μέση καθαρή πυκνότητα ακτινοβολίας [MJ/m² d]

G : Πυκνότητα ροής θερμότητας στο έδαφος [MJ/m² d], u_2 : ταχύτητα ανέμου στο επίπεδο των 2 μέτρων [m/sec], ($G = 0$, για ημερήσιο βήμα εκτίμησης).

Η διαφορά της τάσης κορεσμένων υδρατμών με την πραγματική τάση υδρατμών ($e_s - e_a$) ονομάζεται «Έλλειμμα κορεσμού» (VPD, Vapour pressure deficit)

e_s : τάση κορεσμένων υδρατμών [kPa] $e_s = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 T_{mean}}{T_{mean} + 237.3}\right)$

$$T_{mean} = (T_{max} + T_{min})/2$$

Δ : Κλίση καμπύλης τάσης υδρατμών [kPa/°C] (Slope Vapour Pressure Curve)

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T_{mean} + 237.3)^2}$$

e_a : Πραγματική τάση υδρατμών [kPa], για ημερήσιο βήμα εκτίμησης ET_o συνίσταται η παρακάτω σχέση

$$e_a = \frac{1}{2} \left[e_s(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e_s(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100} \right]$$

Ψυχομετρική σταθερά (γ): $\gamma = 0,00163 \frac{P}{\lambda}$ Όπου P η ατμοσφαιρική πίεση συναρτήσει του υψομέτρου

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

Και λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (latent Heat of Vaporization) [MJ/kg]

$$\lambda = 2,501 - (2,361 * 10^{-3})T_{mean}.$$

Σε φυσιολογικά επίπεδα θερμοκρασιών η τιμή του λ αλλάζει ελαφρά οπότε μπορεί να λαμβάνεται

$$\lambda = 2,45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} (T = 20^\circ\text{C}).$$

Η εξίσωση Hargreaves (1975) η οποία τροποποιήθηκε το 1985 για συνθήκες γρασιδιού και απαιτεί μετρήσεις θερμοκρασίας και ακολουθεί την Εξίσωση 8.

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

Η τελική μορφή της εξίσωσης Corais για τον υπολογισμό της ημερήσιας ET_o εκφράζεται από την Εξίσωση 9 καθώς και από τις Εξισώσεις 10 και 11.

$$ET_o = m_1 + m_2 C_2 + m_3 C_1 + m_4 C_1 C_2 \quad (9)$$

Όπου $m_1 = 0,057$, $m_2 = 0,277$, $m_3 = 0,643$, $m_4 = 0,124$ και

$$C_1 = 0,6416 - 0,00784RH + 0.372R_s - 0.00264R_s RH \quad (10)$$

$$C_2 = -0,0033 + 0,00812T + 0.101R_s - 0.00584R_s T \quad (11)$$

Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου Valiatzas εκφράζεται από την εξίσωση εκφράζεται από την Εξίσωση 12

$$ET_o \approx 0,0393R_S\sqrt{T + 9,5} - 0,19R_S^{0,6}\varphi^{0,15} + 0,078(T + 20)\left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (12)$$

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι και οι παράμετροι τους έχουν αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 2.

Για την συγκριτική αξιολόγηση των τιμών της ET_o των εμπειρικών μεθόδων (Hargreaves-Samani, Copais και Valiatzas) σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο αναφοράς FAO- 56 PM (χρήση δεδομένων GAIATron), υπολογίστηκαν η ποσοστιαία διαφορά, η συνάρτηση συσχέτισης (Correlation Function) και το Σφάλμα μέσης τετραγωνικής ρίζα (Root Mean Square Error – RMSE).

Πιο αναλυτικά, ο συντελεστής συσχέτισης χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσει τη σχέση μεταξύ των δύο τιμών. Όσο ο συντελεστής συσχέτισης είναι πιο κοντά στο +1 ή στο -1, τότε υποδεικνύει θετική ή αρνητική συσχέτιση μεταξύ των τιμών. Η θετική συσχέτιση υποδηλώνει ότι εάν για παράδειγμα οι τιμές σε ένα πίνακα αυξάνονται, θα αυξάνονται και οι τιμές στον άλλο πίνακα. Ένας συντελεστής συσχέτισης που είναι πιο κοντά στο 0, υποδηλώνει μηδενική ή αδύναμη συσχέτιση.

Η Εξίσωση 13 που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

$$Correl(x, y) = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x-\bar{x})^2\Sigma(y-\bar{y})^2}} \quad (13)$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) είναι η τυπική απόκλιση των υπολειμμάτων. Το υπολείμματα είναι ένα μέτρο του πόσο μακριά από την γραμμή παλινδρόμησης βρίσκονται τα σημεία δεδομένων – το RMSE είναι ένα μέτρο του πόσο διασκορπισμένα αυτά τα υπολείμματα. Με άλλα λόγια ο RMSE είναι ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μέτρο των διαφορών μεταξύ των τιμών που προβλέπονται από ένα μοντέλο και των παρατηρούμενων τιμών. Οι τιμές του RMSE είναι πάντα μη αρνητικές και οι τιμές κοντά στο 0 υποδηλώνουν τέλεια προσαρμογή στα δεδομένα. Η αντίστοιχη Εξίσωση 14 είναι η ακόλουθη:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\Sigma_{i=1}^N(Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (14)$$

Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε προκειμένου να αξιολογηθεί η εκτίμηση που δίνει κάθε μέθοδος και κατά πόσο αυτή υπερεκτιμά ή υποεκτιμά την ET_o . Τα διαγράμματα καθώς και οι συγκεντρωτικοί πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5.

Πέρα από τη σύγκριση των εμπειρικών μεθόδων με την πρότυπη μέθοδο αναφοράς, συγκρίθηκαν και όλες οι μέθοδοι μεταξύ τους, αυτές με τα δεδομένα από τον ERA5-L με αυτές των επίγειων δεδομένων. Ουσιαστικά, συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν με βάση τα δεδομένα που εισάγουμε σε κάθε μέθοδο και υπολογίστηκαν ξανά ο συντελεστής συσχέτισης, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) καθώς επίσης ο συντελεστής R^2 και ο συντελεστής της τυπικής γραμμικής παλινδρόμησης ($y=ax+b$), τα οποία χρησιμοποιούνται συχνά ως μέτρο συσχέτισης.

Το R^2 (R-squared) είναι ένα στατιστικό μέτρο που είναι ένα μοντέλο παλινδρόμησης το οποίο αντιπροσωπεύει το ποσοστό της διαφοράς ή της διακύμανσης σε στατιστικούς όρους για μια εξαρτημένη μεταβλητή. Με άλλα λόγια καθορίζει πόσο καλά τα δεδομένα ταιριάζουν με το μοντέλο παλινδρόμησης. Όταν η τιμή του R^2 είναι κοντά 1 σημαίνει ότι όλες οι κινήσεις ή αλλαγές της εξαρτημένης μεταβλητής ερμηνεύονται πλήρως από τις αλλαγές της ανεξάρτητης μεταβλητής. Εάν υπάρχει οποιαδήποτε σχέση ή συσχέτιση που μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική μεταξύ αυτών των δύο μεταβλητών, τότε υποδεικνύει εάν υπάρχει αλλαγή στην ανεξάρτητη μεταβλητή στην τιμή, τότε η άλλη εξαρτημένη μεταβλητή πιθανότητα θα αλλάξει την τιμή.

4.2. Ανάλυση Ευαισθησίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_0) είναι μια σημαντική παράμετρος για τον υδρολογικό κύκλο καθώς επίσης και για γεωργικές και περιβαλλοντικές μελέτες. Οι αλλαγές στις μετεωρολογικές συνιστώσες της ET_0 μπορούν να επηρεάσουν τις τιμές της, και αυτό μπορεί να έχει κλιματικές και περιβαλλοντικές συνέπειες (Cha et al., 2014).

Η ανάλυση ευαισθησίας έχει αποτελέσει σημαντικό στάδιο για την ανάλυση για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών μοντέλων. Για την καλύτερη κατανόηση των μετεωρολογικών συστημάτων και ιδίως για την ανάδειξη της φυσικής σημασίας κάθε μετεωρολογικής παραμέτρου που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Εξορισμού η ανάλυση ευαισθησίας μελετά την επίδραση της μεταβολής μίας παραμέτρου σε μια άλλη (McCuen, 1974). Η έρευνα των (Ambas & Baltas, 2012), ανέδειξε την ανάγκη αξιολόγησης της φυσικής σημασίας των παραμέτρων του μοντέλου και της σχετικής επιρροής τους στις μετεωρολογικές μεταβλητές. Το 2006 οι Irmak et al. αξιολόγησαν τους συντελεστές ευαισθησίας για περιοχές με διαφορετικά κλιματικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν μεγάλη χωρική μεταβλητότητα. Το συμπέρασμα ήταν ότι για περιοχές με ισχυρούς και ξηρούς ανέμους η ταχύτητα του ανέμου ήταν η πιο σημαντική. Την ίδια χρονιά οι Gong et al. αξιολόγησαν τους συντελεστές ευαισθησίας για τη λεκάνη απορροής του ποταμού Yangtze και ανέδειξαν τη μεγάλη χωρική μεταβλητότητά τους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η εκτίμηση των επιδράσεων των μετεωρολογικών μεταβλητών στην εξατμισοδιαπνοή, πραγματοποιήθηκε μεταβάλλοντας κατά +/- 5, 10, 15, 20, 25 και 30% τις μετεωρολογικές μεταβλητές και αξιολογώντας την επίδραση την επίδραση που είχαν κάθε φορά στην υπολογισμένη εξατμισοδιαπνοή.

Οι συντελεστές ευαισθησίας υπολογίστηκαν για 2 διαφορετικές περιόδους:

- Ξηρή περίοδο (Ιούλιος- Σεπτέμβριος)
- Εαρινή περίοδος (Μάρτιος – Μάιος)

Η επιλογή των ανωτέρω περιόδων έγινε για λόγους συνοχής των διαθέσιμων χρονοσειρών, οι οποίες καλύπτουν διακριτές καλλιέργειες και ως εκ τούτου καλλιεργητικές περιόδους. Συνεπώς η ανάλυση ευαισθησίας γίνεται κατ' αναγκαιότητα στις δύο παραπάνω χρονικές περιόδους, αλλά αναμένεται να καταδείξει χαρακτηριστικά την ευαισθησία της εκάστοτε εξεταζόμενης εξίσωσης με επίγεια και δεδομένα επανάλυσης για κάθε παράμετρο.

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για όλες τις βασικές μετεωρολογικές παραμέτρους που απαιτούνται από κάθε μέθοδο. Εφαρμόστηκε και εξετάστηκε για τις εξής παραμέτρους:

- μέση, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία (T_{avg} , T_{min} , T_{max})
- μέση σχετική υγρασία (RH_{avg})
- ταχύτητα ανέμου (u)
- ηλιακή ακτινοβολία (R_s)

Αναλυτικά τα διαγράμματα για την κάθε μετεωρολογική παράμετρο που αναλύθηκε για τις δύο διαφορετικές περιόδους θα αναφερθούν στην Ενότητα 5.3.

5. Αποτελέσματα

5.1. Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων ET_o με FAO56-PM – ERAL & GAIATron

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα από την συγκριτική αξιολόγηση των τριών εμπειρικών μεθόδων σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο αναφοράς FAO56 – PM. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά σταθμό για το σύνολο των μηνών που υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα καθώς και διαγραμματικά. Στο τέλος της παρούσας παραγράφου, στον Πίνακα 15 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον δείκτη RMSE, τον συντελεστή συσχέτισης και την ποσοστιαία διαφορά.

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Λάρισα, Έτος 2019**

Στην περιοχή της Λάρισας για το έτος 2019, παρατηρούμε ότι η ET_o υποεκτιμάται με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης ERA5L σε σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα.

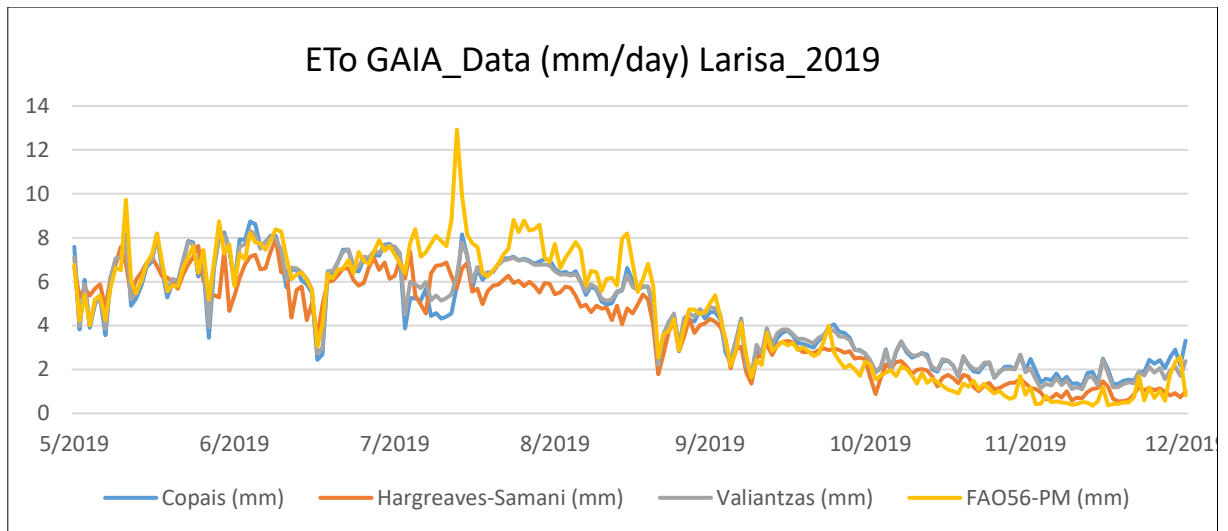
Αναφορικά με τις εμπειρικές μεθόδους κάνοντας χρήση των επίγειων δεδομένων, αυτή που προσεγγίζει τη μέθοδο αναφοράς είναι η μέθοδος Valiantzas και ακολουθεί η μέθοδος Copais. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος Valiantzas παρουσιάζει μικρή υπερεκτίμηση της τάξης του 0.26%, ενώ η μέθοδος Copais παρουσιάζει μικρή υποεκτίμηση της τάξης του 0,47%. Η μέθοδος Hargreaves – Samani, από την οποία απουσιάζει η τιμή της σχετικής υγρασίας RH, υποεκτιμά την ET_o κατά 11.82%.

Η χρήση των δεδομένων επανάλυσης του ERA5L για την ίδια χρονική περίοδο, οδηγούν σε εκτιμήσεις με σημαντική απόκλιση από τη μέθοδο αναφοράς. Η ET_o υποεκτιμάται, πιο συγκεκριμένα: κατά 48.97% για την Copais, 39.4% για την Valiantzas και με μικρότερο ποσοστό ακολουθεί η Hargreaves – Samani, 27.18%. Η μέθοδος αναφοράς FAO56-PM η οποία εκτιμήθηκε και με τις δυο πηγές δεδομένων (GAIATron & ERA5L), φαίνεται να υποεκτιμά τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή κατά 39.35% με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα.

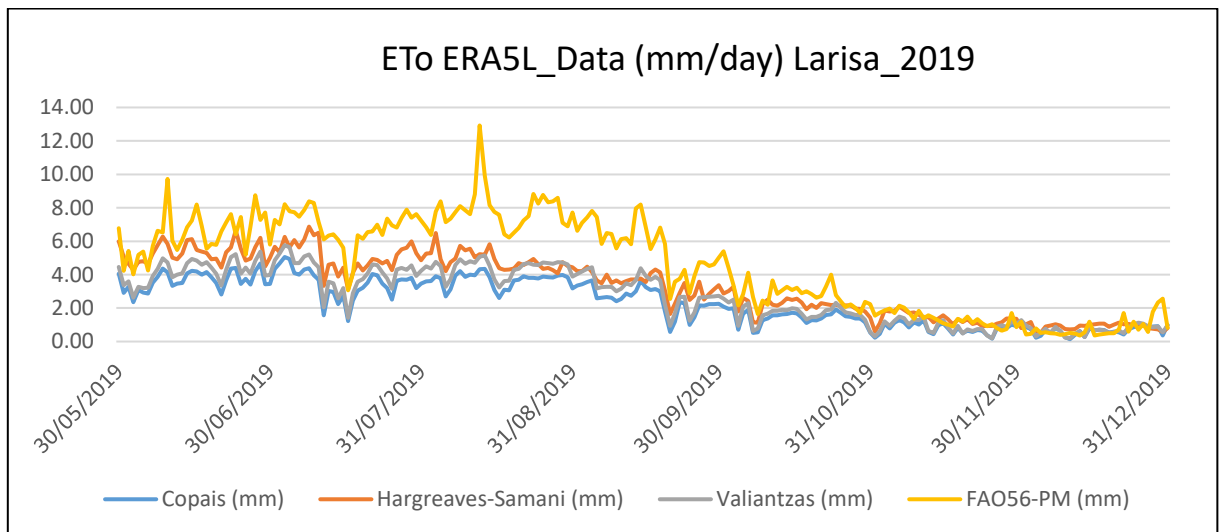
Επίσης από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 15, συμπεραίνουμε ότι και οι τρεις μέθοδοι με χρήση των επίγειων δεδομένων, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές δείκτη σφάλματος RMSE και υψηλές τιμές συντελεστή συσχέτισης. Αντιθέτως η χρήση των δεδομένων επανάλυσης οδηγεί σε συστηματικά υψηλά μεγέθη σφάλματος και χαμηλότερου συντελεστή συσχέτισης. Η μέθοδος Hargreaves – Samani με χρήση των δεδομένων επανάλυσης παρουσιάζεται ως η πιο ακριβής σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (FAO – Επίγεια δεδομένα).

Πίνακας 8. Τιμές ET_o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ERA5L) για την περιοχή της Λάρισας για το έτος 2019

	Copais	Hargreaves-Samani	Valiantzas	FAO56-PM
GAIATron DATA (mm)	982.63	870.56	989.88	987.30
ERA5L DATA (mm)	503.79	718.91	592.94	598.82



Εικόνα 13. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2019) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.



Εικόνα 14. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2019) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάληψης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Λάρισα, Έτος 2020**

Στην περιοχή της Λάρισας για το έτος 2020, παρατηρούμε ότι και αυτή τη χρονιά η ET_o υποεκτιμάται με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης ERA5L σε σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα.

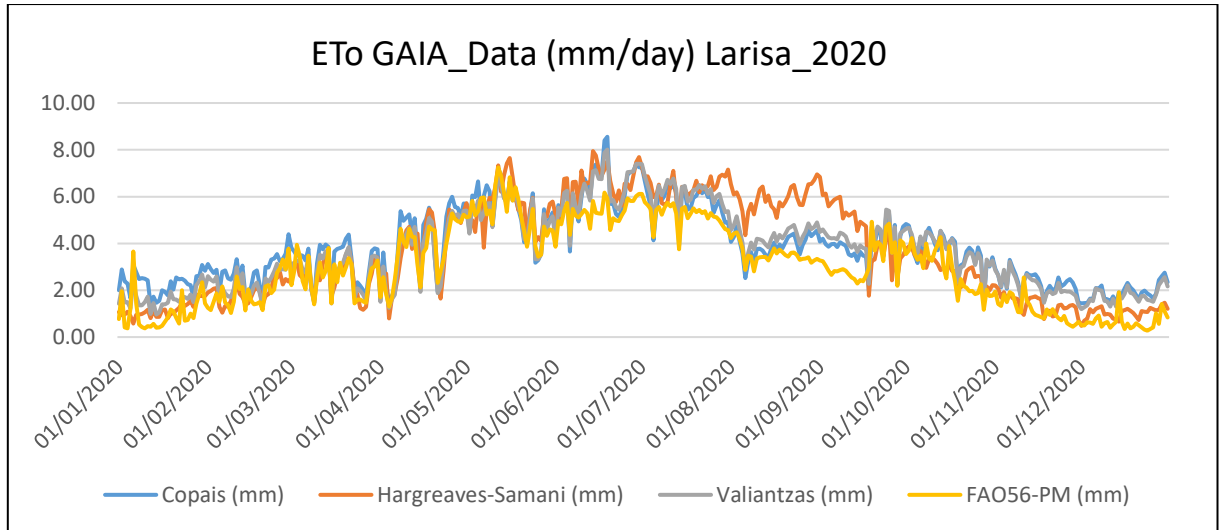
Αναφορικά με τις εμπειρικές μεθόδους κάνοντας χρήση των επίγειων δεδομένων, αυτή που προσεγγίζει τη μέθοδο αναφοράς είναι η μέθοδος Hargreaves – Samani και ακολουθεί η μέθοδος Valiantzas. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος Valiantzas παρουσιάζει υπερεκτίμηση της τάξης του 20.42%, ενώ η μέθοδος Copais παρουσιάζει επίσης υπερεκτίμηση της τάξης του 25.46%. Η μέθοδος Hargreaves – Samani, από την οποία απουσιάζει η τιμή της σχετικής υγρασίας RH, η υπερεκτίμηση ανέρχεται σε 20.42%.

Η χρήση των δεδομένων επανάλυσης του ERA5L για την ίδια χρονική περίοδο, οδηγούν σε εκτιμήσεις με σημαντική απόκλιση από τη μέθοδο αναφοράς. Η ET_o υποεκτιμάται, πιο συγκεκριμένα: κατά 32.21% για την Copais, 23.74% για την Valiantzas και με αρκετά μικρότερο ποσοστό ακολουθεί η Hargreaves – Samani, 2.26%. Η μέθοδος αναφοράς FAO56-PM η οποία εκτιμήθηκε και με τις δυο πηγές δεδομένων (GAIATron & ERA5L), φαίνεται να υποεκτιμά τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή κατά 19.18% με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα.

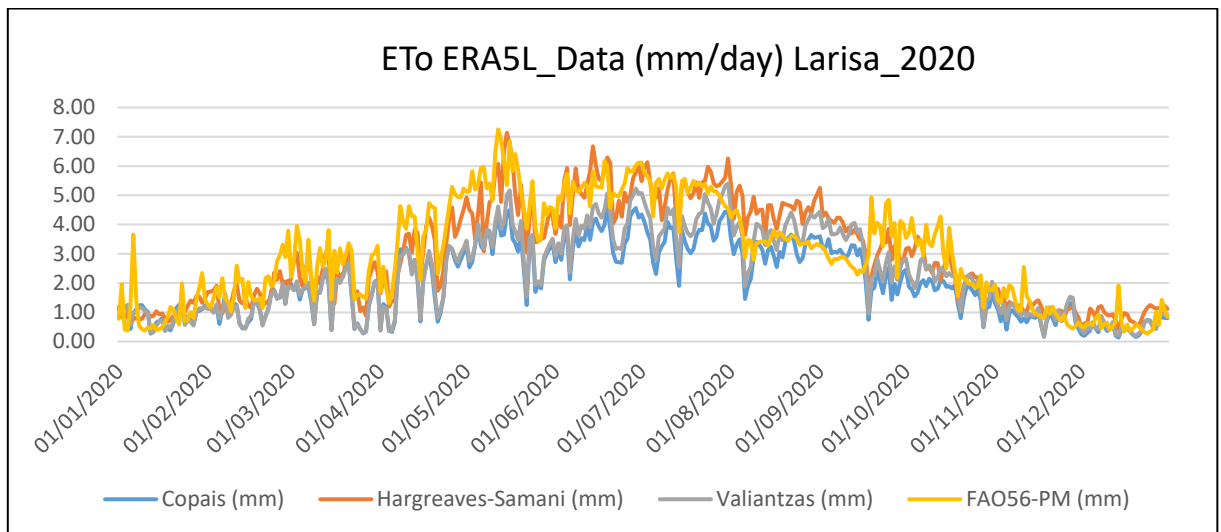
Επίσης από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 15, συμπεραίνουμε ότι και οι τρεις μέθοδοι με χρήση των επίγειων δεδομένων, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές δείκτη σφάλματος RMSE και υψηλές τιμές συντελεστή συσχέτισης. Αντιθέτως η χρήση των δεδομένων επανάλυσης οδηγεί σε συστηματικά υψηλά μεγέθη σφάλματος και χαμηλότερου συντελεστή συσχέτισης. Η μέθοδος Hargreaves – Samani με χρήση των δεδομένων επανάλυσης παρουσιάζεται ως η πιο ακριβής σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (FAO – Επίγεια δεδομένα).

Πίνακας 9. Τιμές ET_o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ERA5L) για την περιοχή της Λάρισας για το έτος 2020

	Copais	Hargreaves-Samani	Valiantzas	FAO56-PM
GAIATRON DATA (mm)	1394.65	1338.63	1351.07	1111.67
ERA5L DATA (mm)	753.65	1086.54	847.80	898.50



Εικόνα 15 Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.



Εικόνα 16 Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάληψης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Λάρισα, Έτος 2021**

Στην περιοχή της Λάρισας για το έτος 2021, παρατηρούμε ότι και αυτή τη χρονιά η ΕΤ_ο υποεκτιμάται με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης ERA5L σε σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα.

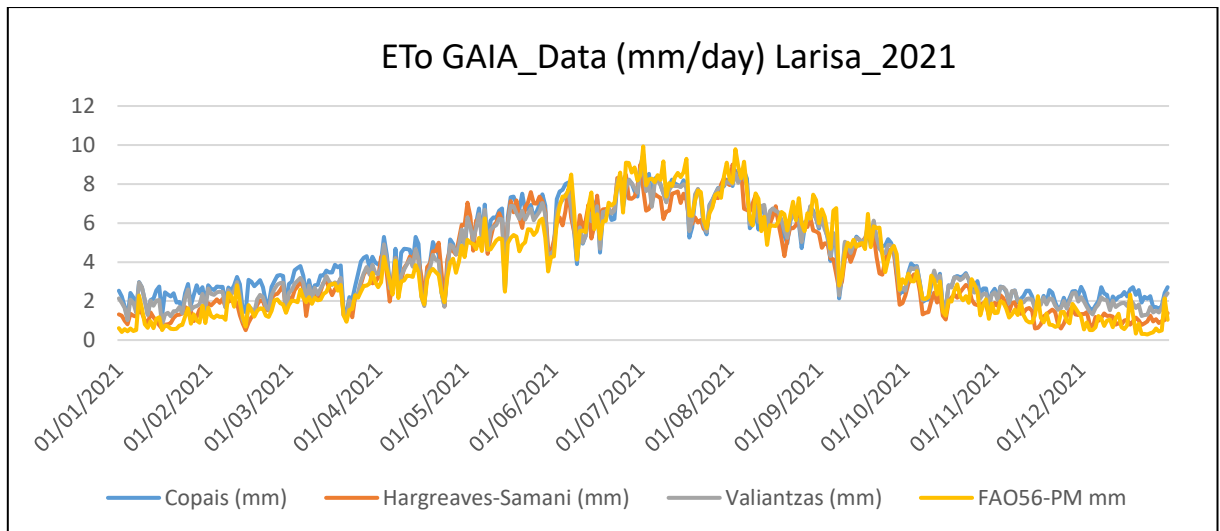
Αναφορικά με τις εμπειρικές μεθόδους κάνοντας χρήση των επίγειων δεδομένων, αυτή που προσεγγίζει τη μέθοδο αναφοράς είναι η μέθοδος Hargreaves – Samani και ακολουθεί η μέθοδος Valiantzas. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος Hargreaves – Samani, από την οποία απουσιάζει η τιμή της σχετικής υγρασίας RH, παρουσιάζει μια μικρή υπερεκτίμηση της τάξης του 0.75%, ενώ οι μέθοδος Copais και Valiantzas παρουσιάζουν επίσης υπερεκτίμηση της τάξης του 15.93% και 10.05% αντίστοιχα.

Η χρήση των δεδομένων επανάλυσης του ERA5L για την ίδια χρονική περίοδο, οδηγούν σε και αυτή τη χρονιά σε εκτιμήσεις με σημαντική απόκλιση από τη μέθοδο αναφοράς. Η ΕΤ_ο υποεκτιμάται, πιο συγκεκριμένα: κατά 45.72% για την Copais, 39.04% για την Valiantzas και με αρκετά μικρότερο ποσοστό ακολουθεί η Hargreaves – Samani, 22.41%. Η μέθοδος αναφοράς FAO56-PM η οποία εκτιμήθηκε και με τις δυο πηγές δεδομένων (GAIATron & ERA5L), φαίνεται να υποεκτιμά τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή κατά 30.27% με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα.

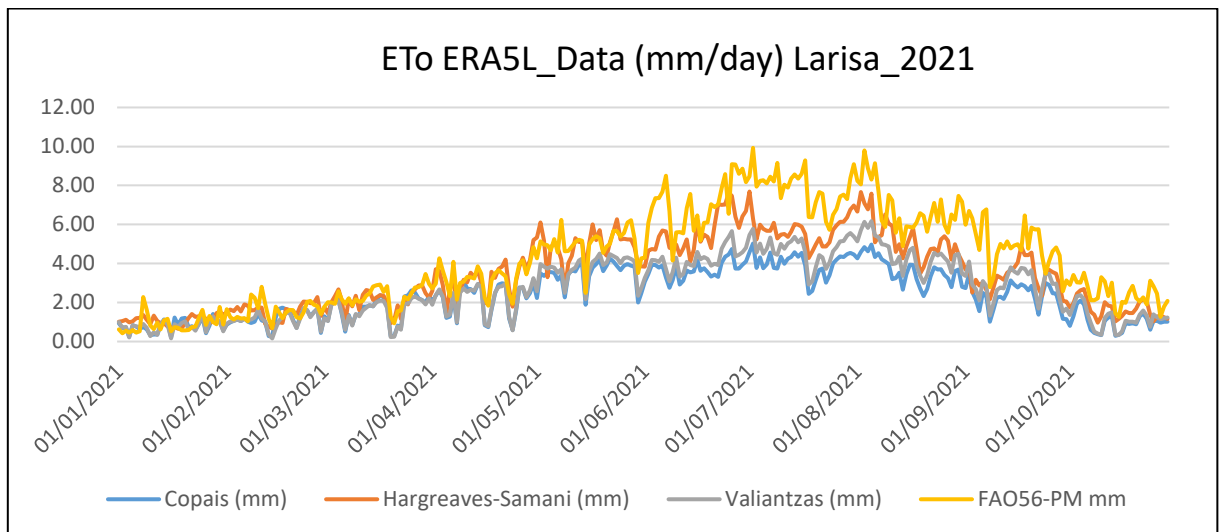
Επίσης από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 15, συμπεραίνουμε ότι και οι τρεις μέθοδοι με χρήση των επίγειων δεδομένων, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές δείκτη σφάλματος RMSE και υψηλές τιμές συντελεστή συσχέτισης. Αντιθέτως η χρήση των δεδομένων επανάλυσης οδηγεί σε συστηματικά υψηλά μεγέθη σφάλματος και χαμηλότερου συντελεστή συσχέτισης. Η μέθοδος Hargreaves – Samani με χρήση των δεδομένων επανάλυσης παρουσιάζεται ως η πιο ακριβής σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (FAO – Επίγεια δεδομένα).

Πίνακας 10. Τιμές ΕΤ_ο (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ERA5L) για την περιοχή της Λάρισας για το έτος 2021

	Copais	Hargreaves-Samani	Valiantzas	FAO56-PM
GAIATRON DATA (mm)	1558.60	1354.47	1479.59	1344.43
ERA5L DATA (mm)	729.77	1043.17	819.61	937.52



Εικόνα 17 Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2021) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.



Εικόνα 18 Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Λάρισας (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάληψης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Κομοτηνή 5.1, Έτος 2020**

Στην περιοχή της Κομοτηνής για το έτος 2020, παρατηρούμε ότι η ET_o εξακολουθεί να υποεκτιμάται με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης ERA5L σε σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα.

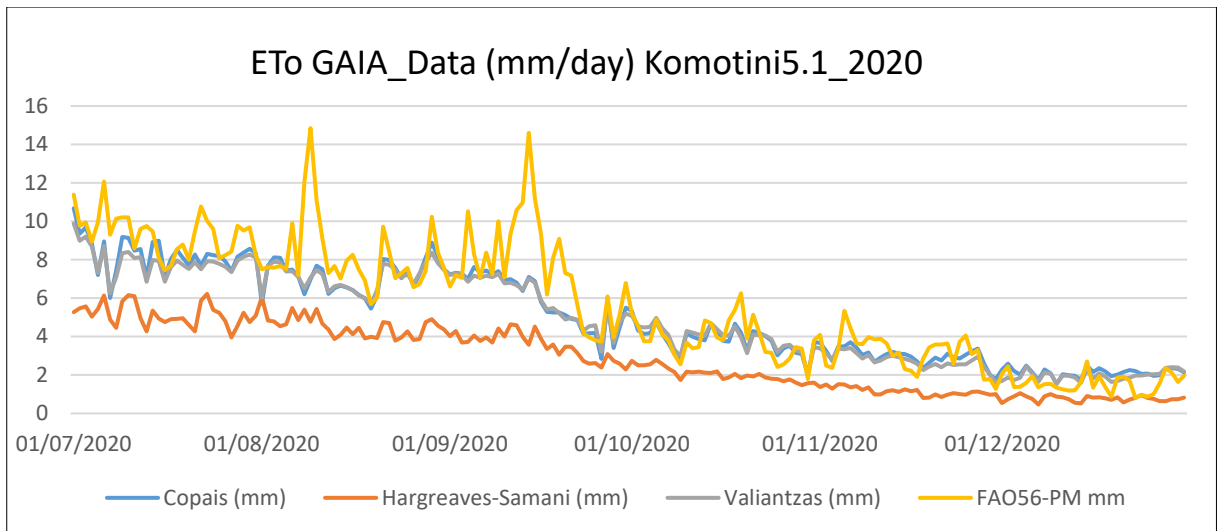
Αναφορικά με τις εμπειρικές μεθόδους κάνοντας χρήση των επίγειων δεδομένων, αυτή που προσεγγίζει τη μέθοδο αναφοράς είναι η μέθοδος Copais και ακολουθεί η μέθοδος Valiantzas. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος Copais παρουσιάζει μια μικρή υποεκτίμηση της τάξης του 10.03%, ενώ η μέθοδος Valiantzas παρουσιάζει υποεκτίμηση κατά 12.15%. Τέλος, η μέθοδος Hargreaves – Samani, από την οποία απουσιάζει η τιμή της σχετικής υγρασίας RH, παρουσιάζει αρκετά υψηλή υποεκτίμηση της τάξης του 49.00%,

Η χρήση των δεδομένων επανάλυσης του ERA5L για την ίδια χρονική περίοδο, οδηγούν σε και σε αυτή την περιοχή σε εκτιμήσεις με σημαντική απόκλιση από τη μέθοδο αναφοράς. Η ET_o υποεκτιμάται, πιο συγκεκριμένα: κατά 62.12% για την Copais, 56.07% για την Valiantzas και με ελάχιστα μικρότερο ποσοστό ακολουθεί η Hargreaves – Samani, 45.28%. Η μέθοδος αναφοράς FAO56-PM η οποία εκτιμήθηκε και με τις δυο πηγές δεδομένων (GAIATron & ERA5L), φαίνεται να υποεκτιμά τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή κατά αρκετά μεγάλο ποσοστό της τάξης του 47.35% με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα.

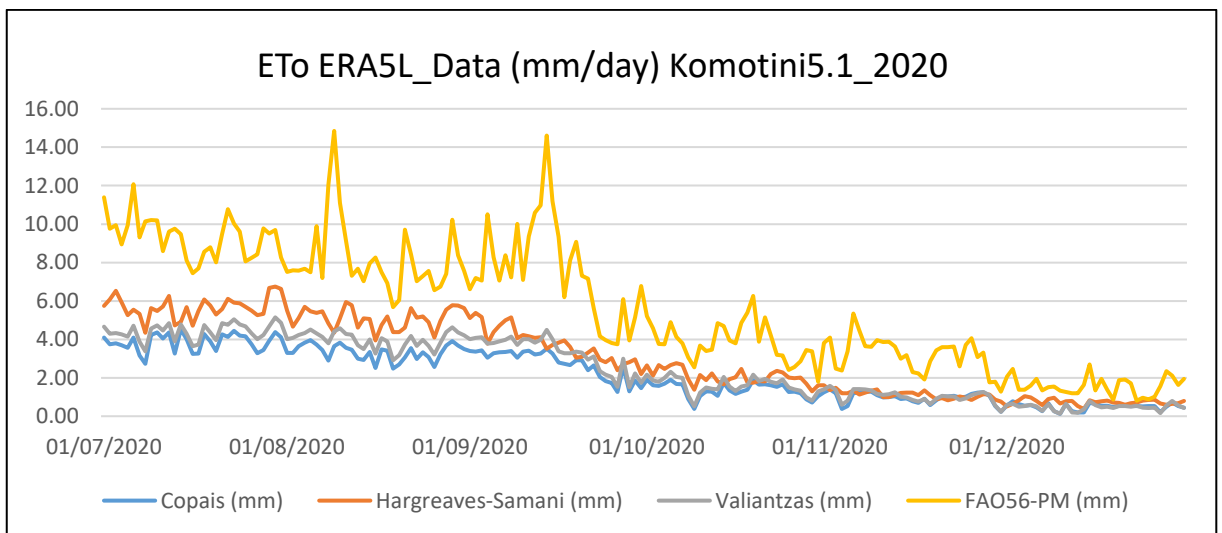
Επίσης από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 15, συμπεραίνουμε ότι και οι τρεις μέθοδοι με χρήση των επίγειων δεδομένων, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές δείκτη σφάλματος RMSE και υψηλές τιμές συντελεστή συσχέτισης. Αντιθέτως η χρήση των δεδομένων επανάλυσης οδηγεί σε συστηματικά υψηλά μεγέθη σφάλματος και χαμηλότερου συντελεστή συσχέτισης (πίνακας 10). Η μέθοδος Hargreaves – Samani με χρήση των δεδομένων επανάλυσης παρουσιάζεται ως η πιο ακριβής σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (FAO – Επίγεια δεδομένα).

Πίνακας 11. Τιμές ET_o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ERA5L) για την περιοχή της Κομοτηνής 5.1 για το έτος 2020

	Copais	Hargreaves-Samani	Valiantzas	FAO56-PM
GAIATRON DATA (mm)	930.65	527.53	908.73	1034.44
ERA5L DATA (mm)	391.87	566.06	454.38	544.68



Εικόνα 19. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.



Εικόνα 20. Διαγραμματική απεικόνιση ET_o για την περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάληψης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Κομοτηνή 6.1, Έτος 2020**

Στην δεύτερη περιοχή της Κομοτηνής για ίδιο το έτος 2020, παρατηρούμε ότι η ET_o εξακολουθεί να υποεκτιμάται με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης ERA5L σε σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα.

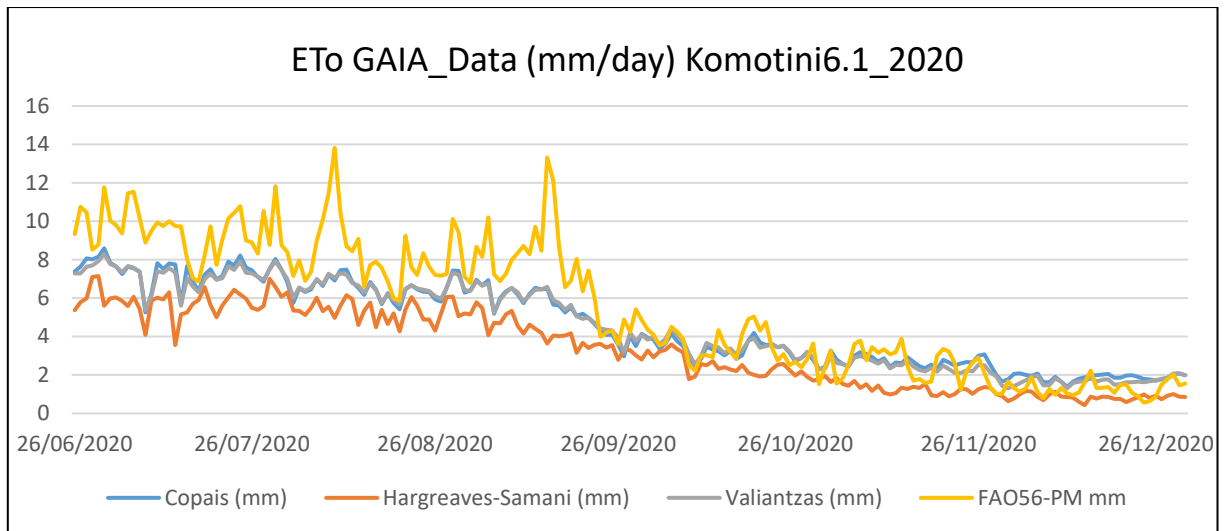
Αναφορικά με τις εμπειρικές μεθόδους κάνοντας χρήση των επίγειων δεδομένων, αυτή που προσεγγίζει τη μέθοδο αναφοράς είναι η μέθοδος Copais και ακολουθεί η μέθοδος Valiantzas. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος Copais παρουσιάζει μια μικρή υποεκτίμηση της τάξης του 16.24%, ενώ η μέθοδος Valiantzas παρουσιάζει υποεκτίμηση κατά 17.47%. Τέλος, η μέθοδος Hargreaves – Samani, από την οποία απουσιάζει η τιμή της σχετικής υγρασίας RH, παρουσιάζει αρκετά υψηλή υποεκτίμηση της τάξης του 38.75%,

Η χρήση των δεδομένων επανάλυσης του ERA5L για την ίδια χρονική περίοδο, οδηγούν σε και σε αυτή την περιοχή σε εκτιμήσεις με σημαντική απόκλιση από τη μέθοδο αναφοράς. Η ET_o υποεκτιμάται, πιο συγκεκριμένα: κατά 61,80% για την Copais, 54.36% για την Valiantzas και με ελάχιστα μικρότερο ποσοστό ακολουθεί η Hargreaves – Samani, 44.53%. Η μέθοδος αναφοράς FAO56-PM η οποία εκτιμήθηκε και με τις δυο πηγές δεδομένων (GAIATron & ERA5L), φαίνεται να υποεκτιμά τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή κατά αρκετά μεγάλο ποσοστό της τάξης του 52.13% με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα.

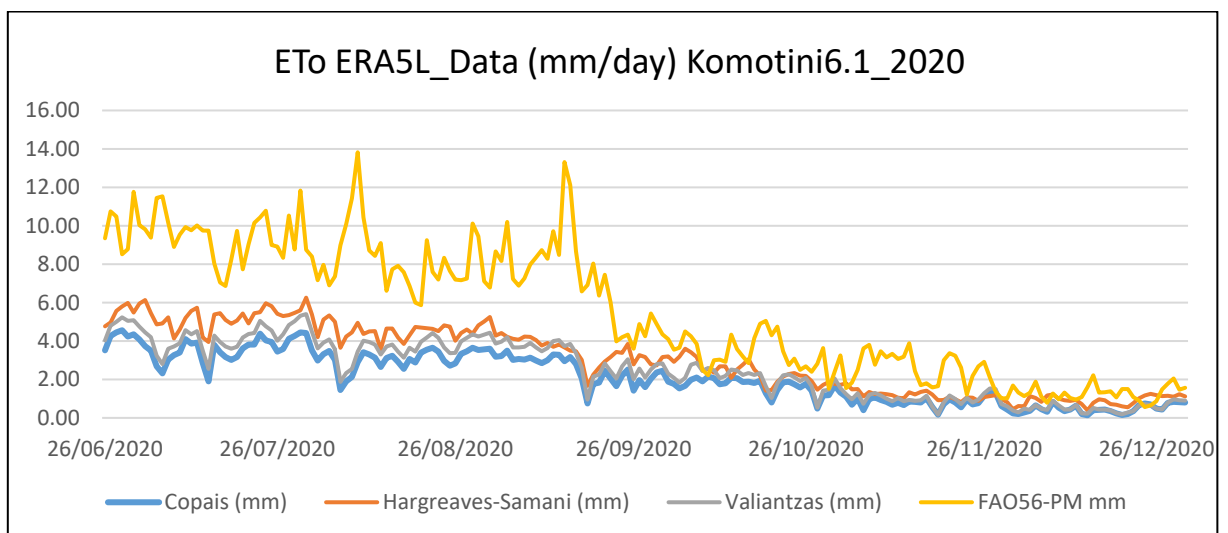
Επίσης από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 15, συμπεραίνουμε ότι και οι τρεις μέθοδοι με χρήση των επίγειων δεδομένων, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές δείκτη σφάλματος RMSE και υψηλές τιμές συντελεστή συσχέτισης. Αντιθέτως η χρήση των δεδομένων επανάλυσης οδηγεί σε συστηματικά υψηλά μεγέθη σφάλματος και χαμηλότερου συντελεστή συσχέτισης (πίνακας 10). Η μέθοδος Hargreaves – Samani με χρήση των δεδομένων επανάλυσης παρουσιάζεται ως η πιο ακριβής σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (FAO – Επίγεια δεδομένα).

Πίνακας 12. Τιμές ET_o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ERA5L) για την περιοχή της Κομοτηνής 6.1 για το έτος 2020

	Copais	Hargreaves-Samani	Valiantzas	FAO56-PM
GAIATRON DATA (mm)	870.24	636.32	857.41	1038.94
ERA5L DATA (mm)	396.89	576.29	474.20	497.35



Εικόνα 21. Διαγραμματική απεικόνιση ET_p για την περιοχή της Κομοτηνής 6.1 (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.



Εικόνα 22. Διαγραμματική απεικόνιση ET_p για την περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάλυσης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Μαραθώνα, Έτος 2021**

Στην περιοχή του Μαραθώνα για το έτος 2021, παρατηρούμε ότι η ET_o εξακολουθεί να υποεκτιμάται με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης ERA5L σε σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα.

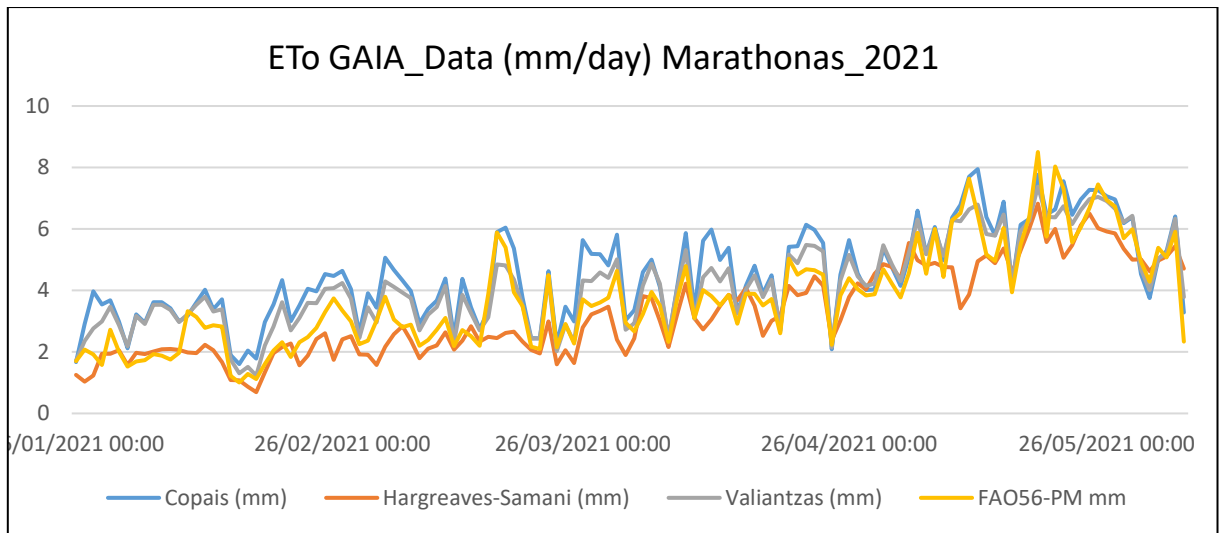
Αναφορικά με τις εμπειρικές μεθόδους κάνοντας χρήση των επίγειων δεδομένων, αυτή που προσεγγίζει τη μέθοδο αναφοράς είναι η μέθοδος Copais και ακολουθεί η μέθοδος Hargreaves – Samani. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος Copais παρουσιάζει υπερεκτίμηση της τάξης του 20.07%, ενώ η μέθοδος Valiantzas υπερεκτιμά κατά 11.90%. Τέλος, η μέθοδος Hargreaves – Samani, από την οποία απουσιάζει η τιμή της σχετικής υγρασίας RH, παρουσιάζει μικρή υποεκτίμηση της τάξης του 13.23%.

Η χρήση των δεδομένων επανάλυσης του ERA5L για την ίδια χρονική περίοδο, οδηγούν σε και σε αυτή την περιοχή σε εκτιμήσεις με σημαντική απόκλιση από τη μέθοδο αναφοράς. Η ET_o υποεκτιμάται, πιο συγκεκριμένα: κατά 38.72% για την Copais, 36.77% για την Valiantzas και με μικρότερο ποσοστό ακολουθεί η Hargreaves – Samani, 18.63%. Η μέθοδος αναφοράς FAO56-PM η οποία εκτιμήθηκε και με τις δυο πηγές δεδομένων (GAIATron & ERA5L), φαίνεται να υποεκτιμά τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή κατά αρκετά μεγάλο ποσοστό της τάξης του 24.85% με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης σε σχέση με τα επίγεια δεδομένα.

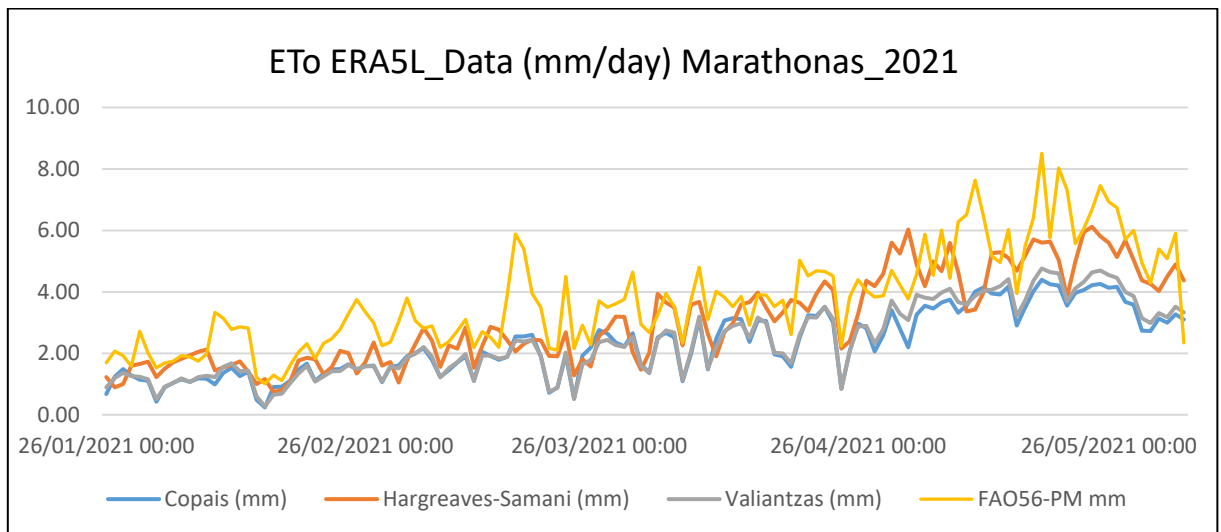
Επίσης από τον συγκεντρωτικό Πίνακα 15, συμπεραίνουμε ότι και οι τρεις μέθοδοι με χρήση των επίγειων δεδομένων, παρουσιάζουν χαμηλές τιμές δείκτη σφάλματος RMSE και υψηλές τιμές συντελεστή συσχέτισης. Αντιθέτως η χρήση των δεδομένων επανάλυσης οδηγεί σε συστηματικά υψηλά μεγέθη σφάλματος και χαμηλότερου συντελεστή συσχέτισης (πίνακας 10). Η μέθοδος Hargreaves – Samani με χρήση των δεδομένων επανάλυσης παρουσιάζεται ως η πιο ακριβής σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (FAO – Επίγεια δεδομένα).

Πίνακας 13. Τιμές ET_o (mm/yr) από επίγεια (GAIA) και δεδομένα επανάλυσης (ERA5L) για την περιοχή του Μαραθώνα για το έτος 2021.

	Copais	Hargreaves-Samani	Valiantzas	FAO56-PM
GAIATRON DATA	586.20	423.66	546.34	488.23
ERA5L DATA	299.17	397.27	308.71	366.91



Εικόνα 23. Διαγραμματική απεικόνιση ET_p για την περιοχή του Μαραθώνα (2021) όπως προκύπτει από τη χρήση επίγειων δεδομένων σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.



Εικόνα 24. Διαγραμματική απεικόνιση ET_p για την περιοχή του Μαραθώνα (2021) όπως προκύπτει από τη χρήση δεδομένων επανάληψης σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM.

- **Συνολική αξιολόγηση αποτελεσμάτων**

Από την σύγκριση των εκτιμήσεων της ET_0 των τριών εμπειρικών μεθόδων σε ημερήσιο βήμα υπολογισμού, έναντι της επιλεγόμενης μεθόδου αναφοράς χρησιμοποιώντας αρχικά τα επίγεια δεδομένα, προκύπτει ότι η μέθοδος Valiatzas παρουσιάζει τη μικρότερη ποσοστιαία διαφορά, τον χαμηλότερο σφάλμα RMSE καθώς και το μεγαλύτερο δείκτη συσχέτισης, σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς FAO56-PM.

Από τους αντίστοιχους υπολογισμούς με τη χρήση των δεδομένων επανάληψης για το ίδιο χρονικό διάστημα και για τις 3 διαφορετικές περιοχές προκύπτουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς αλλά και με το σύνολο των μεθόδων για χρήση με επίγεια δεδομένα. Συγκεκριμένα, το σύνολο των μεθόδων με χρήση των δεδομένων επανάληψης, υποεκτιμούν την τιμή της ET_0 , σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς FAO56-PM. Η μέθοδος Hargreaves – Samani, αποδεικνύεται η πιο ακριβής, παρουσιάζοντας τη μικρότερη υποεκτίμηση της αθροιστικής ανά περίοδο εξατμισοδιαπνοής σε σχέση με την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς, η οποία κατά μέσο όρο υπολογίζεται σε 26,72% .

Πίνακας 14. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων Ποσοστιαία διαφοράς, δείκτη RMSE και του Συντελεστή Συσχέτισης για όλες τις εμπειρικές μεθόδους σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM, κάνοντας χρήση επίγειων δεδομένων (GAIATron).

GAIATron													
Μέθοδος		Copais				Hargreaves- Samani				Valiatzas			
Τοποθεσία / Σταθμός	Έτος	Diff	% diff	RMSE	Correl	Diff	% diff	RMSE	Correl	Diff	% diff	RMSE	Correl
Larisa	2019	4.67	0.47%	1.18	0.92	116.75	11.82%	1.25	0.93	-2.57	-0.26%	1.04	0.95
	2020	-282.98	-25.46%	0.99	0.94	-226.95	-20.42%	1.20	0.88	-239.39	-21.53%	0.87	0.95
	2021	-214.18	-15.93%	1.01	0.96	-10.04	-0.75%	0.86	0.94	-135.16	-10.05%	0.76	0.97
Komotini 5.1	2020	103.79	10.03%	1.54	0.91	506.92	49.00%	3.29	0.91	125.71	12.15%	1.60	0.92
Komotini 6.1	2020	168.71	16.24%	1.75	0.95	402.62	38.75%	2.80	0.90	181.54	17.47%	1.76	0.96
Marathonas	2021	-97.97	-20.07%	0.98	0.92	64.57	13.23%	0.97	0.86	-58.10	-11.90%	0.71	0.95
Μέσος όρος			-5.78%	1.24	0.93		15.27%	1.73	0.90		-2.35%	1.12	0.95

Πίνακας 15. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων Ποσοστιαία διαφοράς, δείκτη RMSE και του Συντελεστή Συσχέτισης για όλες τις εμπειρικές μεθόδους σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM, κάνοντας χρήση δεδομένων επανάλυσης (ERA5L).

ERA5-LAND																		
Μέθοδος		Copais				Hargreaves-Samani				Valiatzas				FAO				
Τοποθεσία / Σταθμός	Έτος	Diff	% diff	RMSE	Correl	Diff	% diff	RMSE	Correl	Diff	% diff	RMSE	Correl	Diff	% diff	RMSE	Correl	
Larisa	2019	483.51	48.97%	2.76	0.93	268.40	27.18%	1.85	0.92	394.37	39.94%	2.29	0.95	388.49	39.35%	2.31	0.96	
	2020	358.03	32.21%	1.34	0.87	25.13	2.26%	0.81	0.89	263.87	23.74%	1.17	0.85	213.18	19.18%	1.03	0.88	
	2021	614.65	45.72%	2.16	0.91	301.26	22.41%	1.32	0.92	524.82	39.04%	1.81	0.94	406.91	30.27%	1.66	0.94	
Komotini 5.1	2020	642.57	62.12%	4.06	0.92	468.38	45.28%	3.12	0.87	580.06	56.07%	3.65	0.93	489.76	47.35%	3.05	0.97	
Komotini 6.1	2020	642.06	61.80%	4.16	0.87	462.65	44.53%	3.20	0.88	564.74	54.36%	3.72	0.87	541.59	52.13%	3.64	0.89	
Marathonas	2021	189.07	38.72%	1.67	0.90	90.96	18.63%	1.25	0.78	179.52	36.77%	1.58	0.91	121.32	24.85%	1.17	0.92	
Μέσο όρος			48.26%	2.69	0.90		26.72%	1.92	0.88		41.65%	2.37	0.91		35.52%	2.14	0.93	

5.2. Συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων ET_o – ERA5L & GAIATron

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων μεταξύ τους, με βάση τα δεδομένα εισόδου. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίθηκαν οι μέθοδοι στις οποίες είχαν χρησιμοποιηθεί επίγεια δεδομένα με την αντίστοιχη μέθοδο με δεδομένα επανάλυσης ERA5L. Για κάθε «ζευγάρι» έχει υπολογιστεί ο δείκτης RMSE, ο συντελεστής συσχέτισης, ο συντελεστής R² και η κλίση α από τη γραμμική συσχέτιση.

• Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Λάρισα, Έτος 2019

Στην περιοχή της Λάρισας για το έτος 2019, και αναφορικά με τα διαγράμματα που απεικονίζουν την διασπορά των εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o), όπως αυτή προκύπτει από την χρήση επίγειων και δεδομένων επανάλυσης (ERA5L), η μέθοδος Hargreaves-Samani παρουσιάζει την καλύτερη συσχέτιση σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις μεθόδους υπολογισμού. Επιπλέον, εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα RMSE καθώς και τον μεγαλύτερο δείκτη συσχέτισης. Ακολουθεί, η μέθοδος Valiatzas με μέτρια συσχέτιση καθώς και το αμέσως επόμενο χαμηλότερο σφάλμα RMSE και μια καλή σχετικά τιμή για τον δείκτη συσχέτισης. Επίσης, κρίνοντας από τις κλίσεις α , η μέθοδος Hargreaves – Samani με επίγεια δεδομένα προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές ET_o που προκύπτουν από την ίδια μέθοδο κάνοντας όμως χρήση δεδομένων επανάλυσης.

Αντιθέτως, όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς του σφάλματος RMSE και του δείκτη συσχέτισης, τις χειρότερες συσχετίσεις παρουσιάζουν οι μέθοδοι Copais και FAO56-PM. Αυτό, επιβεβαιώνεται και την διασπορά που εμφανίζουν οι εκτιμήσεις των συγκεκριμένων μεθόδων όπως αυτές απεικονίζονται στα διαγράμματα του παραρτήματος 8.1.

Στον Πίνακα 16 παραθέτονται οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης που προέκυψαν από την συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων υπολογισμού της ET_o που έχουν ως πηγή δεδομένων τα επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, σε σχέση με τις ίδιες μεθόδους υπολογισμού της ET_o όπου έγινε χρήση των δεδομένων επανάλυσης.

Πίνακας 16. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET_o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Λάρισας (2019).

Λάρισα 2019				
	Copais	Hargreaves-Samani	Valiatzas	FAO56 PM
RMSE	2.36	0.86	1.96	2.29
R²	0.85	0.97	0.88	0.89
Correlation	93.52%	98.40%	95.17%	96.69%
a (y=ax)	0.53	0.82	0.62	0.58

Αντίστοιχη ανάλυση έγινε και για τις μετεωρολογικές μεταβλητές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 17. Όπως προκύπτει από τις κλίσεις α τα δεδομένα επανάλυσης από ERA5L προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες τιμές των επίγειων δεδομένων. Η μόνη τιμή που παρουσιάζει όχι και τόσο ικανοποιητική προσέγγιση είναι αυτή της εισερχόμενης ηλιακής

ακτινοβολίας Rs. Οι συσχετίσεις της θερμοκρασίας (T_{max} και T_{avg}) είναι σχεδόν άριστες. Οι υπόλοιπες τιμές εμφανίζουν σχετικά μέτριες προς καλές συσχετίσεις.

Πίνακας 17. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Λάρισα 2019

Λάρισα 2019					
	Tair _{max} (°C)	Tair _{min} (°C)	Tair _{avg} (°C)	RH (%)	Rs (MJ/m ² /day)
a (y=ax)	0.95	1.23	1.07	0.90	0.46
R²	0.95	0.74	0.96	0.73	0.77

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Λάρισα, Έτος 2020**

Στην περιοχή της Λάρισας για το έτος 2020, και αναφορικά με τα διαγράμματα που απεικονίζουν την διασπορά των εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o), όπως αυτή προκύπτει από την χρήση επίγειων και δεδομένων επανάλυσης (ERA5L), η μέθοδος Hargreaves-Samani παρουσιάζει την καλύτερη συσχέτιση σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις μεθόδους υπολογισμού. Επιπλέον, εμφανίζει ένα σχετικά μικρό σφάλμα RMSE καθώς και τον μεγαλύτερο δείκτη συσχέτισης. Επίσης, κρίνοντας από τις κλίσεις **a**, η μέθοδος Hargreaves – Samani με επίγεια δεδομένα προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές ET_o που προκύπτουν από την ίδια μέθοδο κάνοντας όμως χρήση δεδομένων επανάλυσης.

Αντιθέτως, όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς του σφάλματος RMSE και του δείκτη συσχέτισης, τις χειρότερες συσχετίσεις παρουσιάζουν οι υπόλοιπες τρεις μέθοδοι. Αυτό, επιβεβαιώνεται και την διασπορά που εμφανίζουν οι εκτιμήσεις των συγκεκριμένων μεθόδων όπως αυτές απεικονίζονται στα διαγράμματα του Παραρτήματος 0.

Στον Πίνακα 18 παραθέτονται οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης που προέκυψαν από την συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων υπολογισμού της ET_o που έχουν ως πηγή δεδομένων τα επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, σε σχέση με τις ίδιες μεθόδους υπολογισμού της ET_o όπου έγινε χρήση των δεδομένων επανάλυσης

Πίνακας 18. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET_o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Λάρισας (2020).

Λάρισα 2020				
	Copais	Hargreaves-Samani	Valiatzas	FAO56 PM
RMSE	1.71	0.96	1.44	0.79
R²	0.79	0.96	0.83	0.76
Correlation	86.86%	98.08%	90.01%	88.70%
a (y=ax)	0.56	0.80	0.65	0.78

Αντίστοιχη ανάλυση έγινε και για τις μετεωρολογικές μεταβλητές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 19. Όπως προκύπτει από τις κλίσεις **a** τα δεδομένα επανάλυσης από ERA5L προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες τιμές των επίγειων δεδομένων. Η μόνη τιμή που παρουσιάζει όχι και τόσο ικανοποιητική προσέγγιση είναι αυτή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας Rs. Οι συσχετίσεις της θερμοκρασίας (T_{max} και T_{avg}) είναι σχεδόν άριστες. Οι

υπόλοιπες τιμές εμφανίζουν σχετικά μέτριες προς καλές συσχετίσεις. Την χαμηλότερη συσχέτιση την εμφανίζει η τιμή της σχετικής υγρασίας.

Πίνακας 19. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Λάρισα 2020

Λάρισα 2020					
	Tair _{max} (°C)	Tair _{min} (°C)	Tair _{avg} (°C)	RH (%)	Rs (MJ/m ² /day)
a (y=ax)	0.93	1.28	1.09	0.91	0.48
R²	0.97	0.71	0.95	0.61	0.66

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Λάρισα, Έτος 2021**

Στην περιοχή της Λάρισας για το έτος 2021, και αναφορικά με τα διαγράμματα που απεικονίζουν την διασπορά των εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o), όπως αυτή προκύπτει από την χρήση επίγειων και δεδομένων επανάλυσης (ERA5L), η μέθοδος Hargreaves-Samani παρουσιάζει ξανά την καλύτερη συσχέτιση σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις μεθόδους υπολογισμού. Επιπλέον, εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα RMSE καθώς και τον μεγαλύτερο δείκτη συσχέτισης. Ακολουθεί, η μέθοδος Valiatzas με καλή συσχέτιση καθώς και το αμέσως επόμενο χαμηλότερο σφάλμα RMSE και μια καλή σχετικά τιμή για τον δείκτη συσχέτισης. Επίσης, κρίνοντας από τις κλίσεις **a**, η μέθοδος Hargreaves – Samani με επίγεια δεδομένα προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές ET_o που προκύπτουν από την ίδια μέθοδο κάνοντας όμως χρήση δεδομένων επανάλυσης.

Αντιθέτως, όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς του σφάλματος RMSE και του δείκτη συσχέτισης, τις χειρότερες συσχετίσεις παρουσιάζουν οι μέθοδοι Copais και FAO56-PM. Αυτό, επιβεβαιώνεται και την διασπορά που εμφανίζουν οι εκτιμήσεις των συγκεκριμένων μεθόδων όπως αυτές απεικονίζονται στα διαγράμματα του παραρτήματος 0.

Στον Πίνακα 20 παραθέτονται οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης που προέκυψαν από την συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων υπολογισμού της ET_o που έχουν ως πηγή δεδομένων τα επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, σε σχέση με τις ίδιες μεθόδους υπολογισμού της ET_o όπου έγινε χρήση των δεδομένων επανάλυσης.

Πίνακας 20. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET_o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Λάρισας (2020).

Λάρισα 2021				
	Copais	Hargreaves-Samani	Valiatzas	FAO56 PM
RMSE	2.88	1.16	2.28	2.28
R²	0.90	0.97	0.92	0.83
Correlation	93.93%	97.36%	94.16%	85.40%
a (y=ax)	0.53	0.81	0.62	0.65

Και για αυτό το έτος 2021 πραγματοποιήθηκε αντίστοιχη ανάλυση στις μετεωρολογικές μεταβλητές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 21. Όπως προκύπτει από τις κλίσεις **a** τα δεδομένα επανάλυσης από ERA5L προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες τιμές των επίγειων δεδομένων. Η μόνη τιμή που παρουσιάζει όχι και τόσο ικανοποιητική προσέγγιση

είναι αυτή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας R_s . Οι συσχετίσεις της θερμοκρασίας (T_{max} και T_{avg}) είναι σχεδόν άριστες. Οι υπόλοιπες τιμές εμφανίζουν σχετικά μέτριες προς καλές συσχετίσεις. Την χαμηλότερη συσχέτιση την εμφανίζει ξανά η τιμή της σχετικής υγρασίας.

Πίνακας 21. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Λάρισα 2021

Λάρισα 2021					
	$T_{air_{max}}$ (°C)	$T_{air_{min}}$ (°C)	$T_{air_{avg}}$ (°C)	RH (%)	R_s (MJ/m ² /day)
a (y=ax)	0.94	1.28	1.08	0.91	0.50
R²	0.87	0.81	0.97	0.51	0.67

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Κομοτηνή 5.1, Έτος 2020**

Στην περιοχή της Κομοτηνής για τον 5.1 για το έτος 2020, και αναφορικά με τα διαγράμματα που απεικονίζουν την διασπορά των εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o), όπως αυτή προκύπτει από την χρήση επίγειων και δεδομένων επανάλυσης (ERA5L), η μέθοδος Hargreaves-Samani παρουσιάζει ξανά την καλύτερη συσχέτιση σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις μεθόδους υπολογισμού. Επιπλέον, εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα RMSE καθώς και τον μεγαλύτερο δείκτη συσχέτισης. Στην περιοχή της Κομοτηνής οι υπόλοιπες τρεις μέθοδοι (Valiatzas, Copais, FAO56-PM) παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές του σφάλματος RMSE καθώς και μέτριες τιμές του δείκτη συσχέτισης.

Επίσης, κρίνοντας από τις κλίσεις **a**, η μέθοδος Hargreaves – Samani με επίγεια δεδομένα προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές ET_o που προκύπτουν από την ίδια μέθοδο κάνοντας όμως χρήση δεδομένων επανάλυσης. Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνεται από τις διαγραμματικές απεικονίσεις που παραθέτονται στο Παράρτημα 0.

Στον Πίνακα 22 παραθέτονται οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης που προέκυψαν από την συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων υπολογισμού της ET_o που έχουν ως πηγή δεδομένων τα επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, σε σχέση με τις ίδιες μεθόδους υπολογισμού της ET_o όπου έγινε χρήση των δεδομένων επανάλυσης.

Πίνακας 22. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET_o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020).

Κομοτηνή 5.1 2020				
	Copais	Hargreaves-Samani	Valiatzas	FAO56 PM
RMSE	3.14	0.56	2.61	3.05
R²	0.91	0.94	0.90	0.94
Correlation	97.14%	96.91%	97.47%	97.00%
a (y=ax)	0.44	1.08	0.53	0.54

Για το έτος 2020 για την περιοχή της Κομοτηνής 5.1 πραγματοποιήθηκε αντίστοιχη ανάλυση στις μετεωρολογικές μεταβλητές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 23. Όπως προκύπτει από τις κλίσεις **a** τα δεδομένα επανάλυσης από ERA5L προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες τιμές των επίγειων δεδομένων. Η μόνη τιμή που παρουσιάζει όχι και τόσο ικανοποιητική προσέγγιση είναι αυτή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας R_s . Οι

συσχετίσεις της θερμοκρασίας (T_{\max} , T_{\min} και T_{avg}) είναι σχεδόν άριστες. Οι υπόλοιπες τιμές εμφανίζουν σχετικά μέτριες προς καλές συσχετίσεις.

Πίνακας 23. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Κομοτηνή 5.1 2020

Κομοτηνή 5.1 2020					
	$T_{\text{air}_{\max}}$ (°C)	$T_{\text{air}_{\min}}$ (°C)	$T_{\text{air}_{\text{avg}}}$ (°C)	RH (%)	R_s (MJ/m ² /day)
a (y=ax)	0.99	0.89	0.96	1.01	0.42
R²	0.94	0.90	0.95	0.85	0.83

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Κομοτηνή 6.1, Έτος 2020**

Στην περιοχή της Κομοτηνής 6.1 για το έτος 2020, και αναφορικά με τα διαγράμματα που απεικονίζουν την διασπορά των εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_0), όπως αυτή προκύπτει από την χρήση επίγειων και δεδομένων επανάλυσης (ERA5L), η μέθοδος Hargreaves-Samani παρουσιάζει και σε αυτή την περιοχή την καλύτερη συσχέτιση σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις μεθόδους υπολογισμού. Επιπλέον, εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα RMSE καθώς και τον μεγαλύτερο δείκτη συσχέτισης. Επίσης, κρίνοντας από τις κλίσεις **a**, η μέθοδος Hargreaves – Samani με επίγεια δεδομένα προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές ET_0 που προκύπτουν από την ίδια μέθοδο κάνοντας όμως χρήση δεδομένων επανάλυσης.

Αντιθέτως, όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς του σφάλματος RMSE και του δείκτη συσχέτισης, οι υπόλοιπες μέθοδοι υπολογισμού της ET_0 εμφανίζουν τις χειρότερες συσχετίσεις. Αυτό, επιβεβαιώνεται και την διασπορά που εμφανίζουν οι εκτιμήσεις των συγκεκριμένων μεθόδων όπως αυτές απεικονίζονται στα διαγράμματα του Παραρτήματος 0.

Στον Πίνακα 24 παραθέτονται οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης που προέκυψαν από την συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων υπολογισμού της ET_0 που έχουν ως πηγή δεδομένων τα επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, σε σχέση με τις ίδιες μεθόδους υπολογισμού της ET_0 όπου έγινε χρήση των δεδομένων επανάλυσης.

Πίνακας 24. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET_0 κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Κομοτηνής 6.1 (2020).

Κομοτηνή 6.1 2020				
	Copais	Hargreaves-Samani	Valiatzas	FAO56 PM
RMSE	2.73	0.64	2.24	3.64
R²	0.84	0.93	0.86	0.75
Correlation	92.68%	96.80%	93.63%	89.11%
a (y=ax)	0.47	0.93	0.57	0.45

Για το έτος 2020 για την περιοχή της Κομοτηνής 6.1 πραγματοποιήθηκε αντίστοιχη ανάλυση στις μετεωρολογικές μεταβλητές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 25. Όπως προκύπτει από τις κλίσεις **a** τα δεδομένα επανάλυσης από ERA5L προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες τιμές των επίγειων δεδομένων. Η μόνη τιμή που παρουσιάζει όχι και τόσο ικανοποιητική προσέγγιση είναι αυτή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας R_s . Οι συσχετίσεις της θερμοκρασίας (T_{\max} και T_{avg}) είναι σχεδόν άριστες. Οι υπόλοιπες τιμές

εμφανίζουν σχετικά μέτριες προς καλές συσχετίσεις σε αντίθεση με την σχετική υγρασία που εμφανίζει την χειρότερη συσχέτιση.

Πίνακας 25. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Κομοτηνή 6.1 2020

Κομοτηνή 6.1 2020					
	Tair _{max} (°C)	Tair _{min} (°C)	Tair _{avg} (°C)	RH (%)	Rs (MJ/m ² /day)
a (y=ax)	0.97	1.11	1.04	1.02	0.46
R²	0.93	0.73	0.92	0.39	0.78

- **Σύγκριση αποτελεσμάτων: Περιοχή/Σταθμός Μαραθώνα, Έτος 2021**

Στην περιοχή του Μαραθώνα για το έτος 2021, και αναφορικά με τα διαγράμματα που απεικονίζουν την διασπορά των εκτιμήσεων της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (ET_o), όπως αυτή προκύπτει από την χρήση επίγειων και δεδομένων επανάλυσης (ERA5L), η μέθοδος Hargreaves-Samani παρουσιάζει και σε αυτή την περιοχή την καλύτερη συσχέτιση σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις μεθόδους υπολογισμού. Επιπλέον, εμφανίζει το μικρότερο σφάλμα RMSE καθώς και τον μεγαλύτερο δείκτη συσχέτισης.

Επίσης, κρίνοντας από τις κλίσεις **a**, στην περιοχή του Μαραθώνα η μέθοδος Valiatzas με επίγεια δεδομένα προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές ET_o που προκύπτουν από την ίδια μέθοδο κάνοντας όμως χρήση δεδομένων επανάλυσης.

Αντιθέτως, όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς του σφάλματος RMSE και του δείκτη συσχέτισης, οι υπόλοιπες μέθοδοι υπολογισμού της ET_o εμφανίζουν τις χειρότερες συσχετίσεις. Αυτό, επιβεβαιώνεται και την διασπορά που εμφανίζουν οι εκτιμήσεις των συγκεκριμένων μεθόδων όπως αυτές απεικονίζονται στα διαγράμματα του παραρτήματος 0.

Στον Πίνακα 26 παραθέτονται οι στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης που προέκυψαν από την συγκριτική αξιολόγηση όλων των μεθόδων υπολογισμού της ET_o που έχουν ως πηγή δεδομένων τα επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα, σε σχέση με τις ίδιες μεθόδους υπολογισμού της ET_o όπου έγινε χρήση των δεδομένων επανάλυσης.

Πίνακας 26. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες τις μεθόδους υπολογισμού της ET_o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων για της περιοχή της Κομοτηνής 5.1 (2020).

Μαραθώνα 2021				
	Copais	Hargreaves-Samani	Valiatzas	FAO56 PM
RMSE	2.31	0.44	1.90	1.17
R²	0.79	0.93	0.82	0.83
Correlation	90.94%	96.54%	93.52%	91.61%
a (y=ax)	0.52	0.59	0.94	0.74

Τέλος, για το έτος 2021 για την περιοχή του Μαραθώνα πραγματοποιήθηκε αντίστοιχη ανάλυση στις μετεωρολογικές μεταβλητές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 27. Όπως προκύπτει από τις κλίσεις **a** τα δεδομένα επανάλυσης από ERA5L προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες τιμές των επίγειων δεδομένων. Η μόνη τιμή που παρουσιάζει όχι και τόσο ικανοποιητική προσέγγιση είναι αυτή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας

Rs. Οι συσχετίσεις της θερμοκρασίας (T_{max} , T_{min} και T_{avg}) είναι σχεδόν άριστες. Οι υπόλοιπες τιμές εμφανίζουν σχετικά μέτριες προς καλές συσχετίσεις σε αντίθεση με την σχετική υγρασία που και εδώ εμφανίζει την χειρότερη συσχέτιση.

Πίνακας 27. Δείκτες ταύτισης των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων – Μαραθώνας 2021

Μαραθώνας 2021					
	$T_{air_{max}}$ (°C)	$T_{air_{min}}$ (°C)	$T_{air_{avg}}$ (°C)	RH (%)	Rs (MJ/m ² /day)
a (y=ax)	0.96	1.04	1.00	0.93	0.48
R²	0.91	0.87	0.94	0.55	0.71

• Συνολική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Από την σύγκριση των εκτιμήσεων της ET_o όλων των μεθόδων μεταξύ τους, με βάση τα δεδομένα εισόδου (επίγεια και ERA5L), προκύπτει ότι η μέθοδος Hargreaves-Samani παρουσιάζει την καλύτερη συσχέτιση σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις μεθόδους υπολογισμού, καθώς και τον μικρότερο συνολικά δείκτη RMSE Πίνακας 28. Επίσης, κρίνοντας από τις κλίσεις α , η ίδια μέθοδος με επίγεια δεδομένα προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές ET_o που προκύπτουν από την ίδια μέθοδο κάνοντας όμως χρήση δεδομένων επανάλυσης.

Πίνακας 28. Στατιστικοί δείκτες αξιολόγησης για όλες την μεθόδους υπολογισμού Hargreaves – Samani της ET_o κάνοντας χρήση των 2 διαφορετικών πηγών μετεωρολογικών δεδομένων, για όλες τις περιοχές και τα έτη μελέτης

Hargreaves -Samani	Larisa 2019	Larisa 2020	Larisa 2021	Komotini 5.1 2020	Komotini 6.1 2020	Marathon as 2021	Average
RMSE	0.86	0.96	1.16	0.56	0.64	0.44	0.77
R²	0.97	0.96	0.97	0.94	0.93	0.93	0.95
Correlation	98.40%	98.08%	97.36%	96.91%	96.80%	96.54%	97.35%
a (y=ax)	0.82	0.80	0.81	1.08	0.93	0.59	0.84

Επιπλέον, από με την ανάλυση σχετικά με την ταύτιση των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων που πραγματοποιήθηκε για όλες τις περιοχές προκύπτει ότι από τις κλίσεις α τα δεδομένα επανάλυσης από ERA5L προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες τιμές των επίγειων δεδομένων. Η μόνη τιμή που παρουσιάζει όχι και τόσο ικανοποιητική προσέγγιση είναι αυτή της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας Rs. Οι συσχετίσεις της θερμοκρασίας (T_{max} , T_{min} και T_{avg}) είναι σχεδόν άριστες (Πίνακας 29). Οι υπόλοιπες τιμές εμφανίζουν σχετικά μέτριες προς καλές συσχετίσεις.

Πίνακας 29. Μέσες τιμές όπως αυτές προκύπτουν από την ανάλυση σχετικά με την ταύτιση των επίγειων και επανάλυσης ERA5L μετεωρολογικών δεδομένων

Μέσες Τιμές					
	$T_{air_{max}}$ (°C)	$T_{air_{min}}$ (°C)	$T_{air_{avg}}$ (°C)	RH (%)	Rs (MJ/m ² /day)
a (y=ax)	0.96	1.14	1.04	0.95	0.47
R²	0.93	0.79	0.95	0.61	0.74

5.3. Αποτελέσματα Ανάλυση Ευαισθησίας

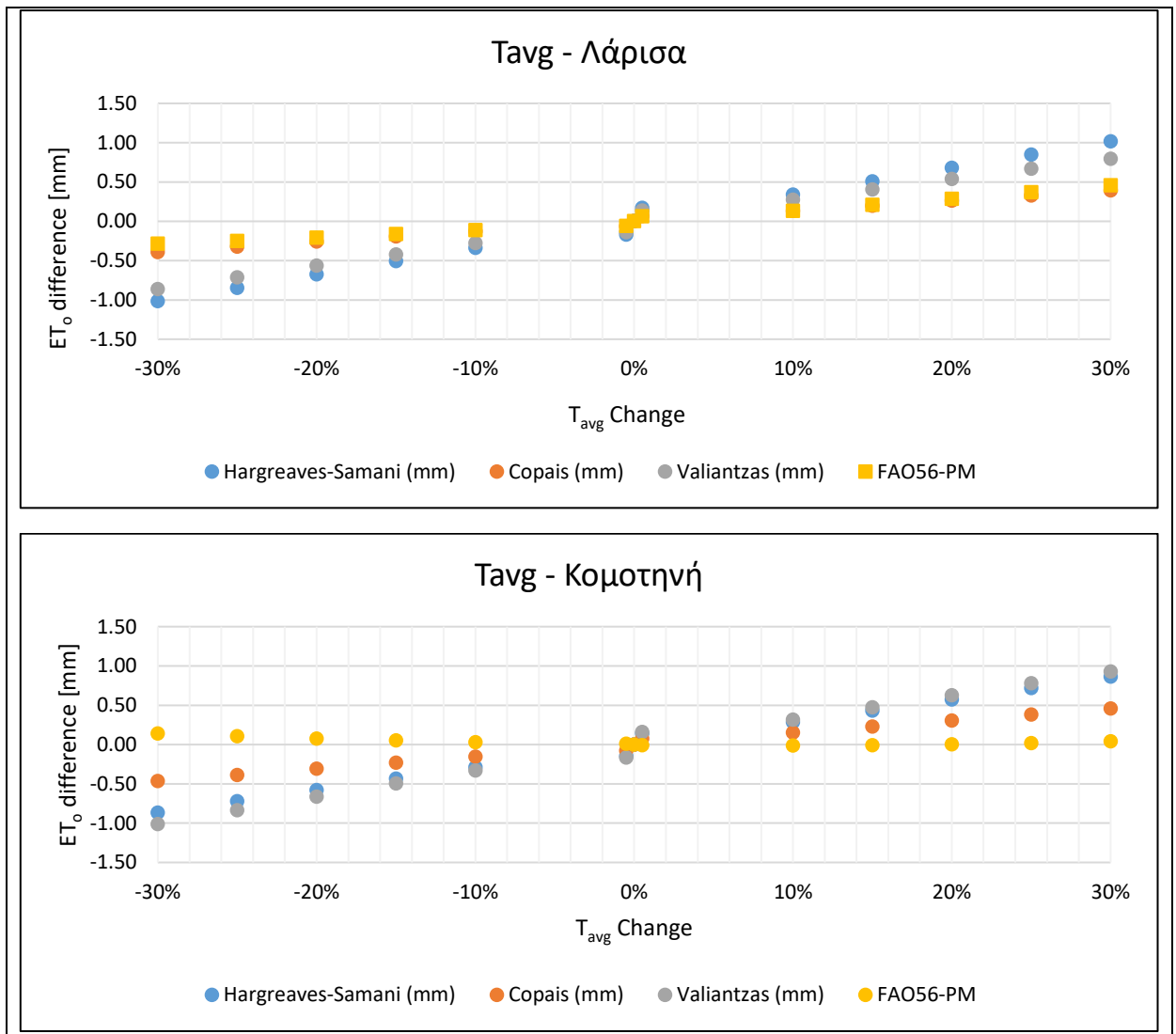
5.3.1. Αποτελέσματα Ξηρής Περιόδου για τις περιοχές της Λάρισας και Κομοτηνής

Στην Παράγραφο 5.3.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για τις μετεωρολογικές παραμέτρους (T_{avg} , R_s , RH_{avg} και U_{avg}), για τις περιοχές της Λάρισας και της Κομοτηνής για την ξηρή περίοδο.

Στην Εικόνα 25 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και της μέσης θερμοκρασίας. Από την διαγραμματική απεικόνιση, συμπεραίνουμε ότι η τιμή της μέσης θερμοκρασίας έχει θετική επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή. Η αύξηση δηλαδή αυτής της μεταβλητής οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της ET_o . Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η επίδραση της T_{avg} ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο καθώς και με την περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι στην περιοχή της Λάρισας η επίδραση είναι πιο έντονη για τις μεθόδους Hargreaves-Samani, ακολουθεί η μέθοδος Valiantzas, ενώ οι μέθοδοι Copais και FAO56-PM εμφανίζουν σχεδόν ίδια αύξηση.

Αντίθετα στην περιοχή της Κομοτηνής για την ξηρή περίοδο η επίδραση της μέσης θερμοκρασίας διαφοροποιείται. Οι μέθοδοι Hargreaves-Samani και Valiantzas επηρεάζονται σχεδόν παρόμοια από την συγκεκριμένη μεταβλητή, παρουσιάζοντας θετική επίδραση. Παρόμοια αλλά μικρότερη επίδραση έχει η μέση θερμοκρασία και στην μέθοδο Copais. Η μέθοδος FAO56-PM παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η T_{avg} η επίδραση είναι ελάχιστη έως και μηδενική, ενώ όταν η μεταβλητή μειώνεται η ET_o κατά FAO56-PM αυξάνεται, που σημαίνει ότι έχει αρνητική επίδραση.

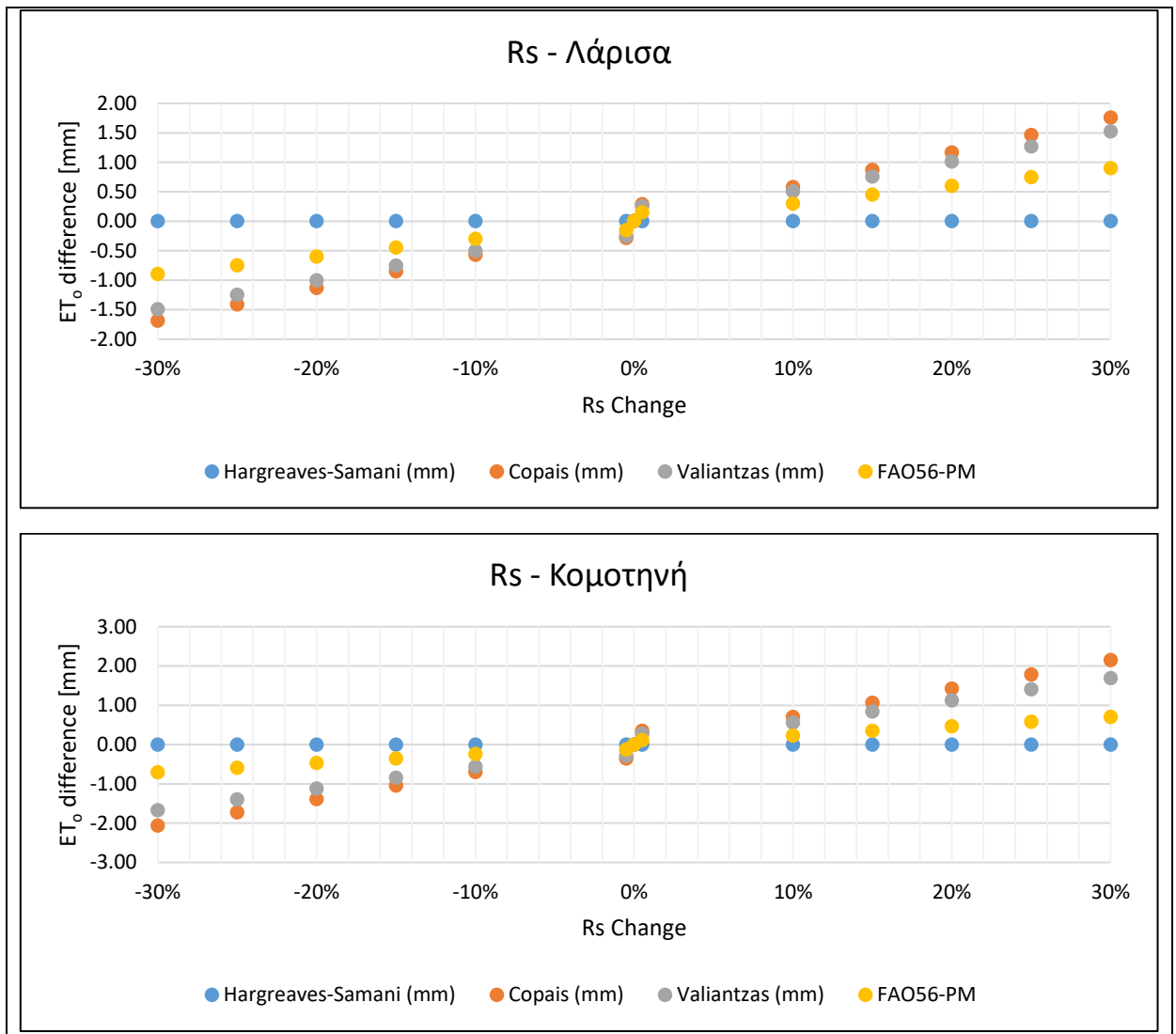
Συμπερασματικά και στις δύο περιοχές οι πιο ευαίσθητες μέθοδοι στον υπολογισμό της ET_o είναι οι Hargreaves-Samani και Valiantzas, αναφορικά με τη μεταβολή της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας. Ακολουθώς η μέθοδος Copais και FAO56-PM παρουσιάζουν την χαμηλότερη ευαισθησία στη μεταβολή της μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας.



Εικόνα 25. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογική παράμετρο T_{avg} για την ξηρή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισσας & Κομοτηνής.

Στην Εικόνα 26 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (R_s). Από την διαγραμματική απεικόνιση, συμπεραίνουμε ότι η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας έχει θετική επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή. Η αύξηση δηλαδή αυτής της μεταβλητής οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της ET_0 . Στην περίπτωση της μεταβλητής R_s , παρατηρούμε ότι η επίδραση της δεν εμφανίζει διαφορές σε σχέση με τη μέθοδο και με την περιοχή.

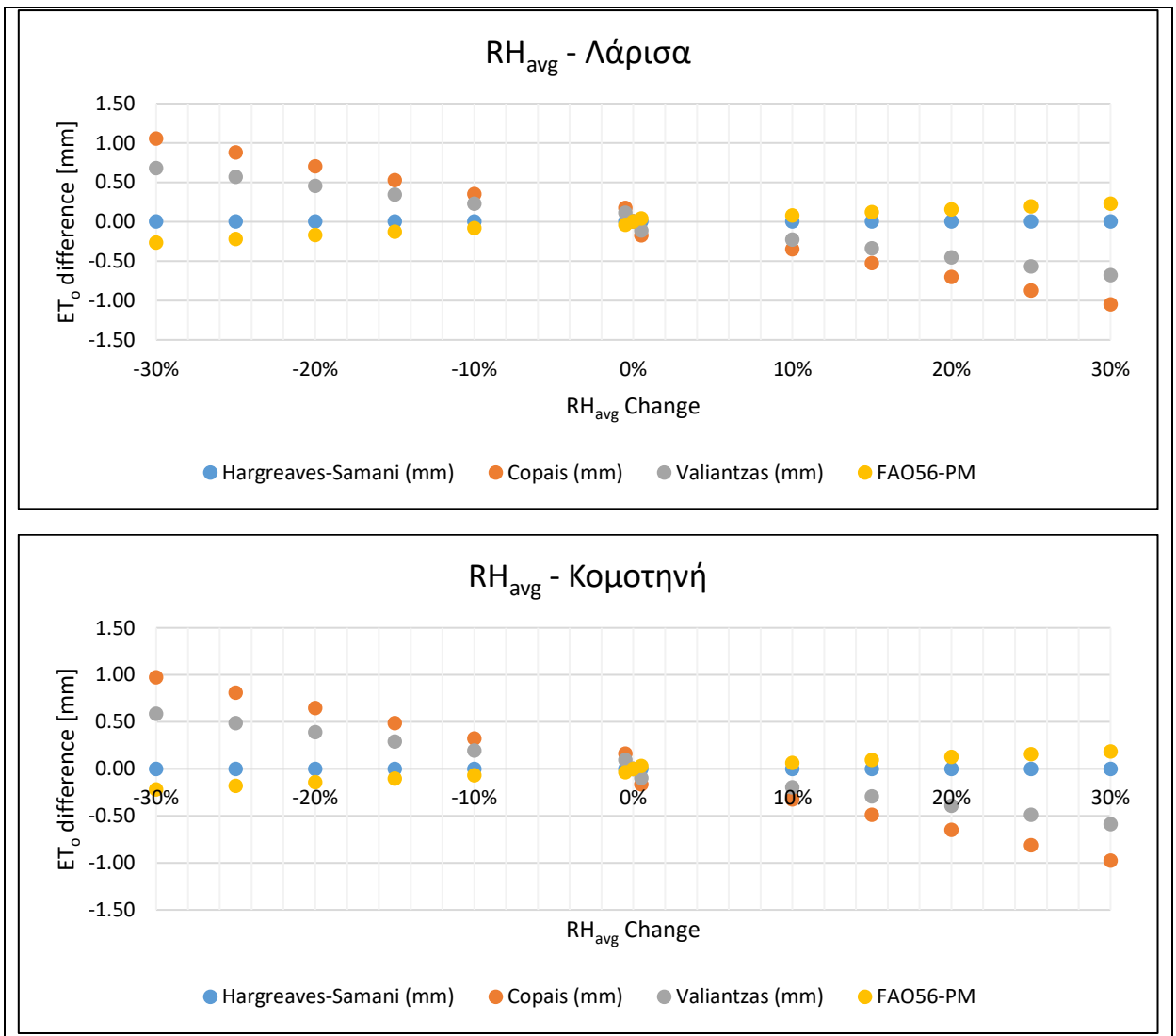
Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι και στις δύο περιοχές η επίδραση είναι πιο έντονη για τις μεθόδους Copais και Valiantzas, ενώ ακολουθεί με μικρότερη αύξηση η FAO56-PM. Η επίδραση της R_s στη μέθοδο Hargreaves-Samani και στις δύο περιοχές είναι μηδενική. Συνεπώς, η πλέον ευαίσθητη μέθοδος, αναφορικά με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι η Copais και ακολούθως η Valiantzas



Εικόνα 26. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογική παράμετρο Rs για την ξηρή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Κομοτηνής.

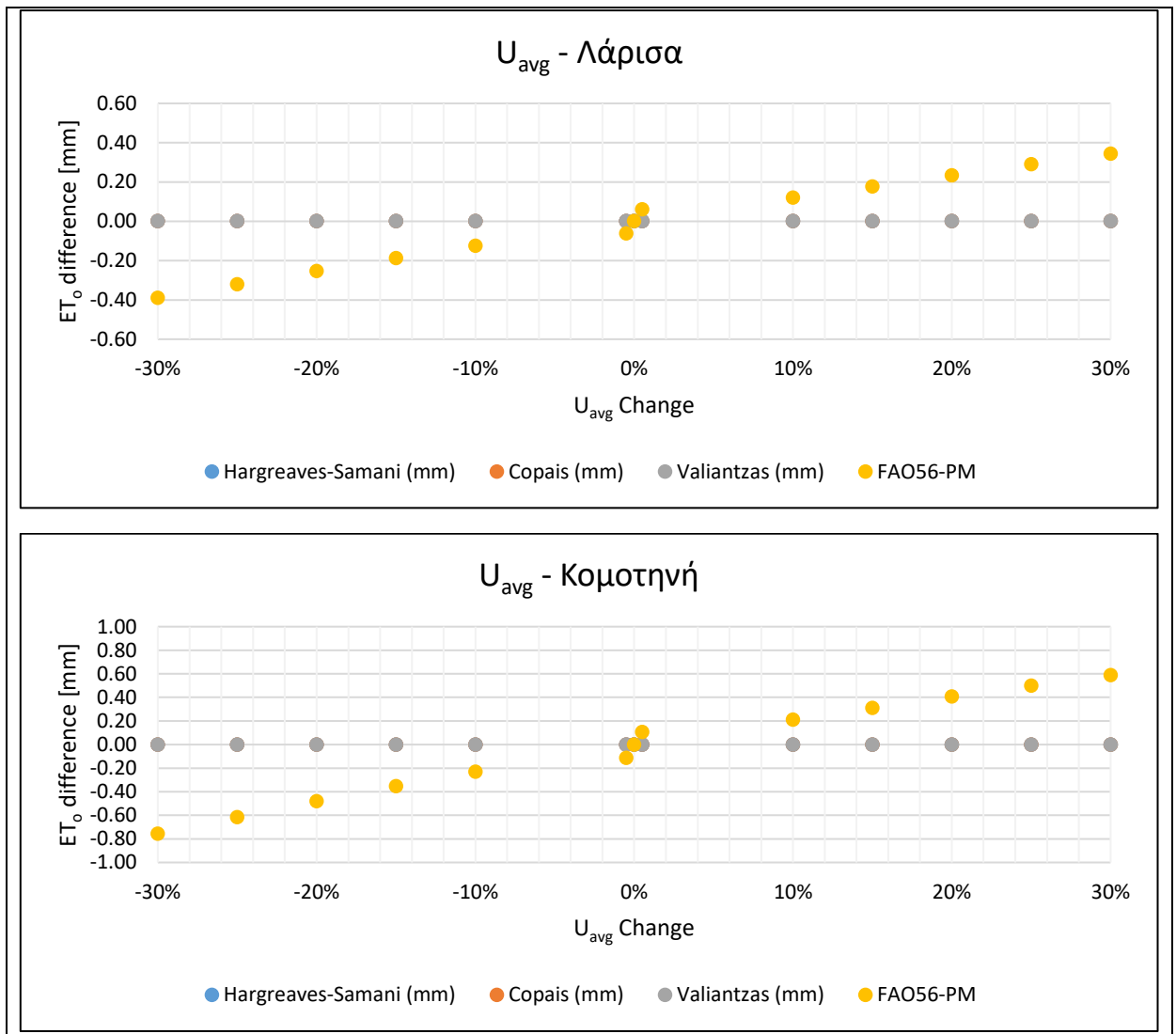
Στην Εικόνα 27 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και μέσης σχετικής υγρασίας (RH_{avg}). Από την διαγραμματική απεικόνιση, συμπεραίνουμε ότι η τιμή της RH_{avg} έχει αρνητική επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή. Η αύξηση δηλαδή αυτής της μεταβλητής οδηγεί σε μείωση της ET_o .

Στην περίπτωση της μεταβλητής της μέσης σχετικής υγρασίας παρατηρούμε ότι η επίδρασή της δεν εμφανίζει διαφορές σε σχέση με τη μέθοδο και με την περιοχή εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται και στις δύο περιοχές η επίδραση είναι πιο έντονη για τις μεθόδους Copais και Valiantzas, ενώ η μέθοδος FAO56-PM εμφανίζει ελάχιστη επίδραση. Η επίδραση της RH_{avg} στη μέθοδο Hargreaves-Samani και στις δύο περιοχές είναι μηδενική.



Εικόνα 27. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογική παράμετρο RH_{avg} για την ξηρή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισσας & Κομοτηνής.

Στην Εικόνα 28 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου (U_{avg}). Από την διαγραμματική απεικόνιση, συμπεραίνουμε ότι η τιμή της U_{avg} έχει θετική επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή και επηρεάζει μόνο την μέθοδο FAO56-PM. Η επίδραση είναι ίδια και στις δύο περιοχές μελέτης.



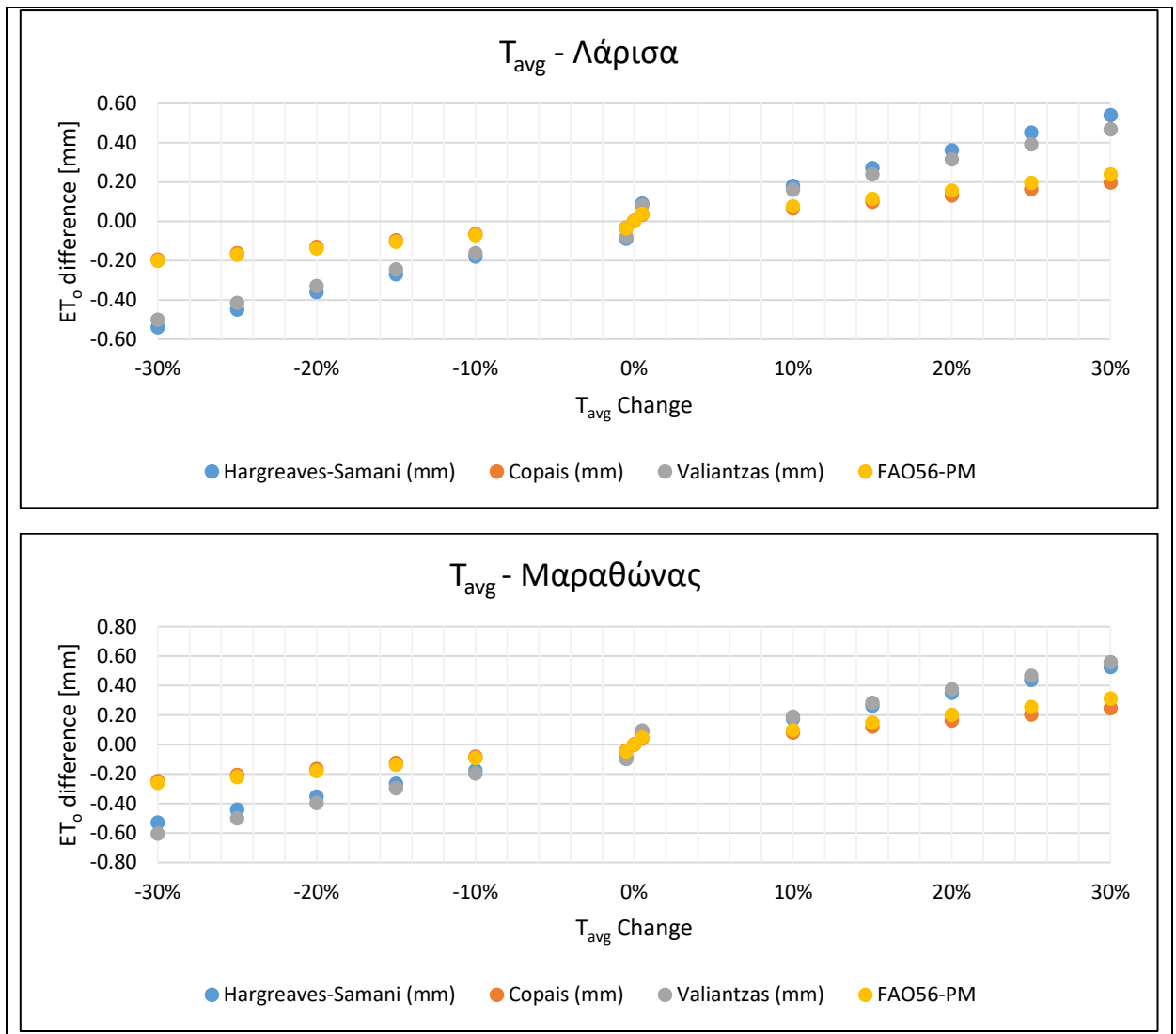
Εικόνα 28. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογική παράμετρο U_{avg} για την ξηρή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισσας & Κομοτηνής.

5.3.2. Αποτελέσματα Εαρινής Περιόδου για τις περιοχές της Λάρισσας και Μαραθώνα

Στην υποενότητα 5.3.2 παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για την εαρινή περίοδο, για τις περιοχές της Λάρισσας και του Μαραθώνα.

Στην Εικόνα 29 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και της μέσης θερμοκρασίας. Από την διαγραμματική απεικόνιση, συμπεραίνουμε ότι η τιμή της μέσης θερμοκρασίας έχει θετική επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή. Η αύξηση δηλαδή αυτής της μεταβλητής οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της ET_0 . Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η επίδραση της T_{avg} ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο. Αναφορικά με την χωρική επίδρασή δεν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις.

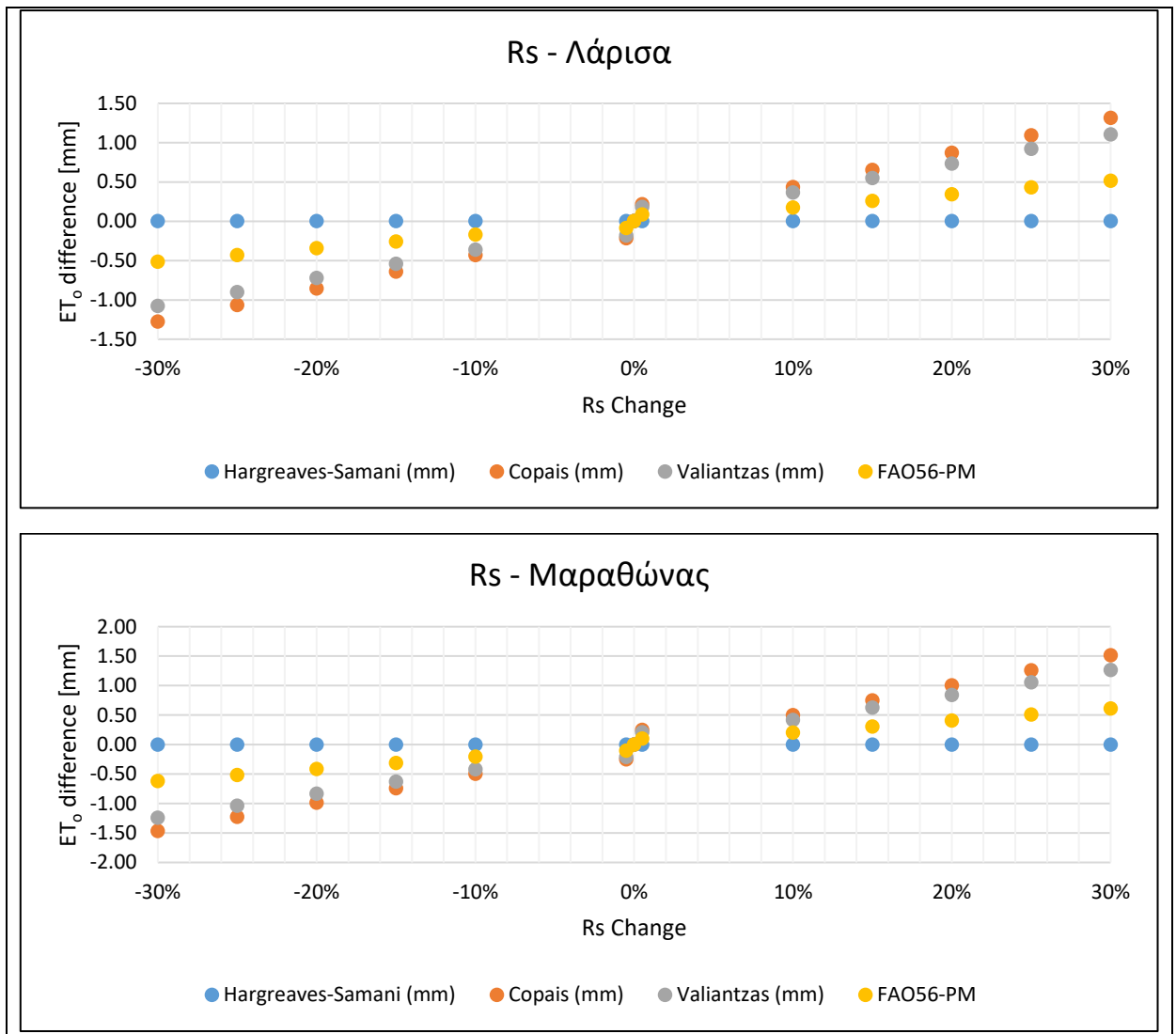
Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι και στις δύο περιοχές η επίδραση είναι πιο έντονη για τις μεθόδους Hargreaves-Samani, ακολουθεί η μέθοδος Valiantzas, ενώ οι μέθοδοι Copais και FAO56-PM εμφανίζουν σχεδόν ίδια αύξηση.



Εικόνα 29. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογική παράμετρο T_{avg} για την εαρινή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισσας & Μαραθώνα.

Στην Εικόνα 30 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (R_s). Από την διαγραμματική απεικόνιση, συμπεραίνουμε ότι η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας έχει θετική επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή. Η αύξηση δηλαδή αυτής της μεταβλητής οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της ET_0 . Στην περίπτωση της μεταβλητής R_s , παρατηρούμε ότι η επίδραση της δεν εμφανίζει διαφορές σε σχέση με τη μέθοδο και με την περιοχή.

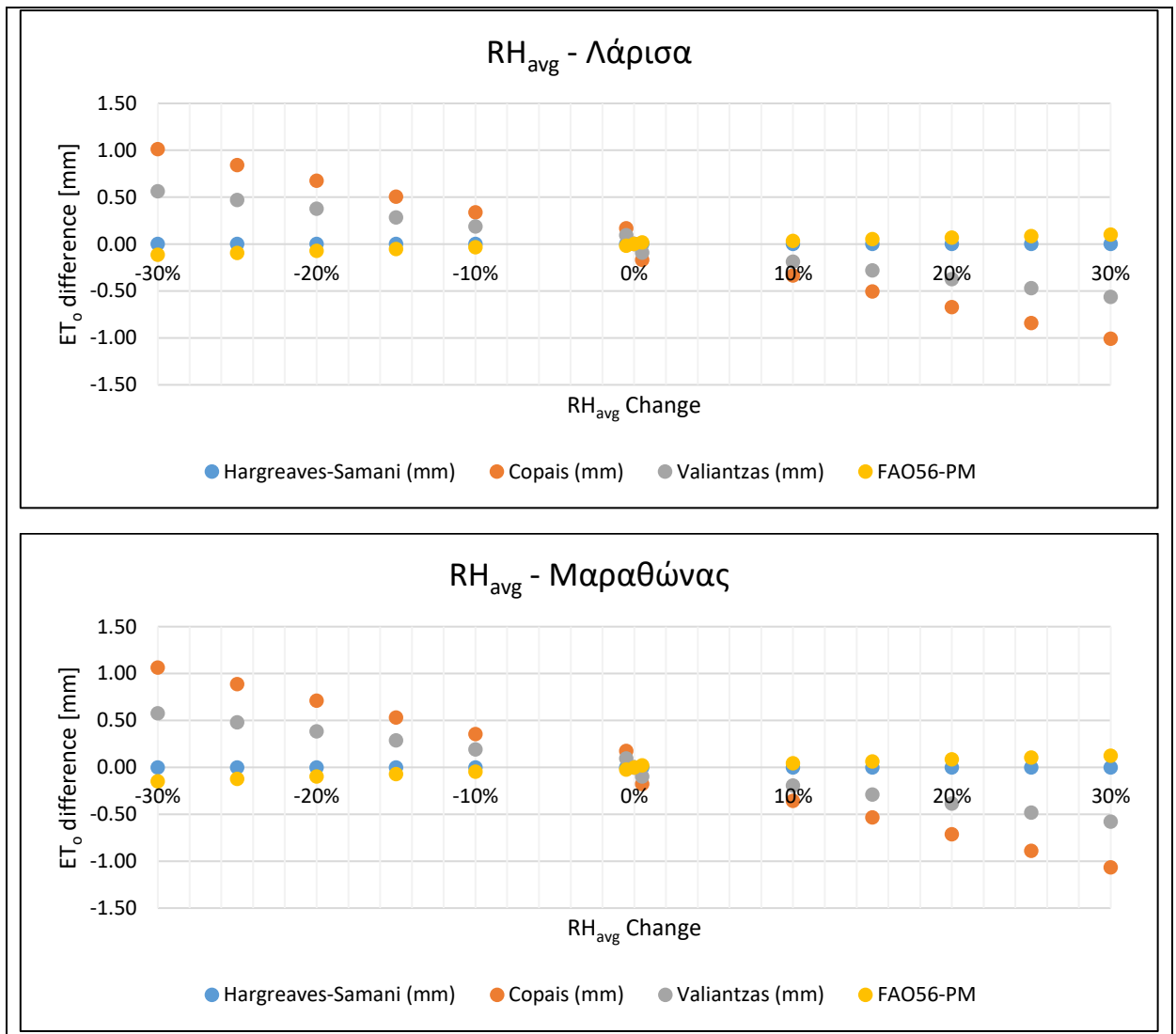
Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι και στις δύο περιοχές η επίδραση είναι πιο έντονη για τις μεθόδους Copais και Valiantzas, ενώ ακολουθεί με μικρότερη αύξηση η FAO56-PM. Η επίδραση της R_s στη μέθοδο Hargreaves-Samani και στις δύο περιοχές είναι μηδενική.



Εικόνα 30. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογική παράμετρο Rs για την εαρινή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισας & Μαραθώνα.

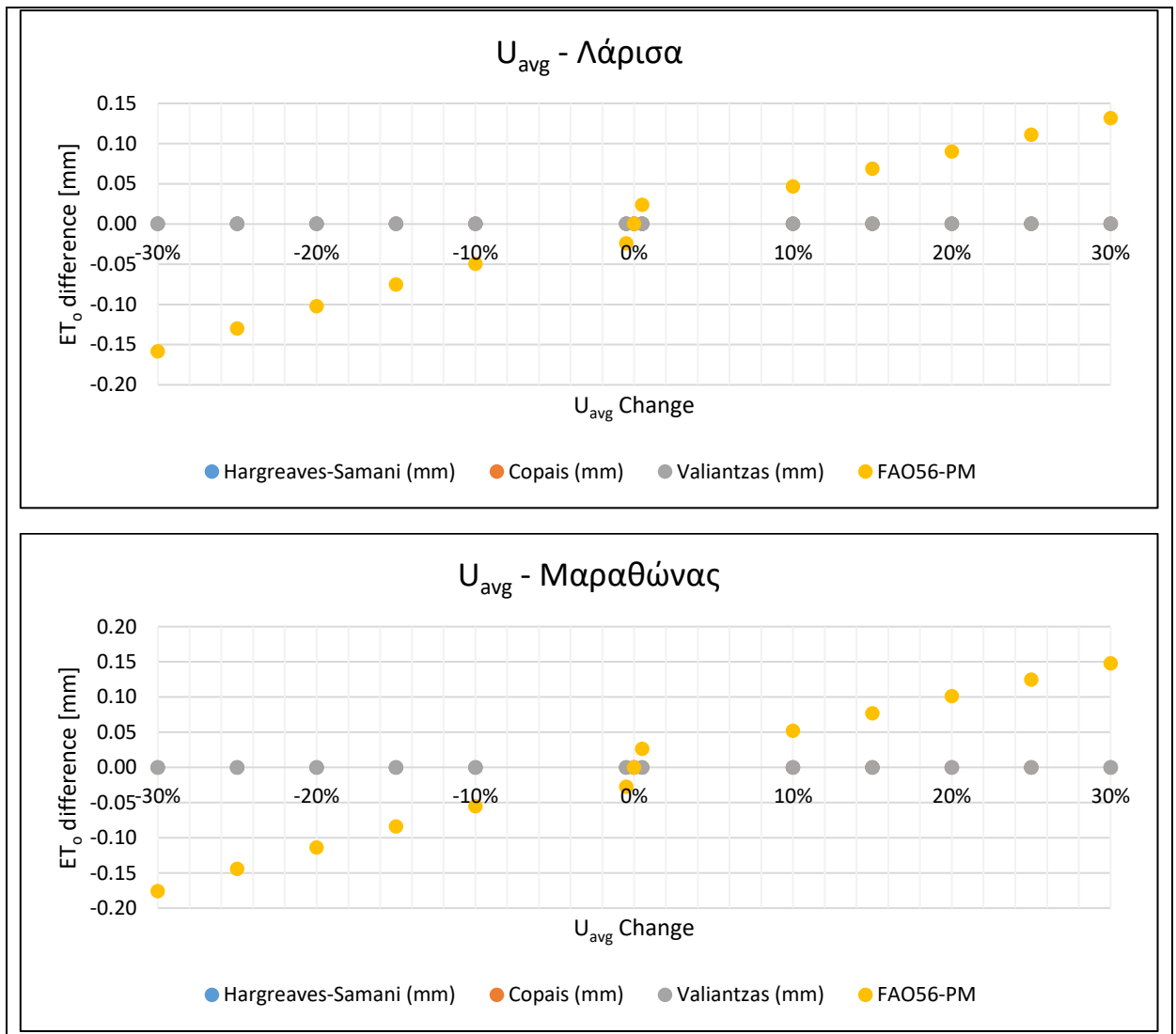
Στην Εικόνα 31 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και μέσης σχετικής υγρασίας (RH_{avg}). Από την διαγραμματική απεικόνιση, συμπεραίνουμε ότι η τιμή της RH_{avg} έχει αρνητική επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή. Η αύξηση δηλαδή αυτής της μεταβλητής οδηγεί σε μείωση της ET_o .

Στην περίπτωση της μεταβλητής της μέσης σχετικής υγρασίας παρατηρούμε ότι η επίδρασή της δεν εμφανίζει διαφορές σε σχέση με τη μέθοδο και με την περιοχή εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται και στις δύο περιοχές η επίδραση είναι πιο έντονη για τις μεθόδους Copais και Valiantzas, ενώ η μέθοδος FAO56-PM εμφανίζει ελάχιστη επίδραση. Η επίδραση της RH_{avg} στη μέθοδο Hargreaves-Samani και στις δύο περιοχές είναι μηδενική.



Εικόνα 31. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογική παράμετρο RH_{avg} για την εαρινή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισσας & Μαραθώνα.

Στην Εικόνα 32 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των μεθόδων υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς και μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου (U_{avg}). Από την διαγραμματική απεικόνιση, συμπεραίνουμε ότι η τιμή της U_{avg} έχει θετική επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή και επηρεάζει μόνο την μέθοδο FAO56-PM. Η επίδραση είναι ίδια και στις δύο περιοχές μελέτης.



Εικόνα 32. Διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης ευαισθησίας για την μετεωρολογική παράμετρο U_{avg} για την εαρινή περίοδο για τις περιοχές της Λάρισσας & Μαραθώνας.

Από την παραπάνω ανάλυση ευαισθησίας συμπεραίνουμε ότι η εξαμυσοδιαπνοή αναφοράς κατά FAO56-PM είναι πιο ευαίσθητη στην ταχύτητα του ανέμου. Στην συγκεκριμένη μεταβλητή και ανεξαρτήτου ξηρή ή εαρινής περιόδου η τιμή της ET_0 κατά Hargreaves – Samani, Copais και Valiantzas δεν επηρεάζονται καθόλου. Η μεταβλητή της μέσης σχετικής υγρασίας είναι η μόνη που και στις δύο περιόδους έχει αρνητική επίδραση στις τιμές της ET_0 κατά Copais & Valiantzas. Στην εαρινή περίοδο και στις δύο περιοχές (Λάρισσα και Μαραθώνας) η επίδραση της RH_{avg} στην ET_0 κατά FAO56-PM και Hargreaves-Samani είναι μηδενική. Αντιθέτως στην ξηρή περίοδο και στις δύο περιοχές (Λάρισσα & Κομοτηνή) η μέθοδος FAO56-PM επηρεάζεται ελάχιστα θετικά από την μεταβλητή RH_{avg} . Από όλες τις μεταβλητές που μελετήθηκαν, προκύπτει ότι η ηλιακή ακτινοβολία είναι αυτή που έχει την μεγαλύτερη επίδραση στην τιμή της ET_0 και σε όλες τις περιοχές και για όλες τις περιόδους. Πιο συγκεκριμένα, η ET_0 κατά Copais είναι αυτή που εμφανίζει την μεγαλύτερη μεταβολή, ενώ ακολουθεί με ελάχιστη διαφορά η μέθοδος Valiantzas. Η μέση θερμοκρασία δεν παρουσιάζει ελάχιστη επίδραση στις τιμές τις ET_0 ανεξαρτήτως περιόδου και περιοχής μελέτης.

6. Συμπεράσματα – Συζήτηση

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αξιολογήσει τη δυνατότητα χρήσης δεδομένων επανάλυσης για την εκτίμηση για την εκτίμηση της ET_0 , καθώς και να διερευνήσει την ακρίβεια των εκτιμήσεων που προέρχονται από διαφορετικές εμπειρικές μεθόδους. Η ακριβής ή έστω μια αρκετά ικανοποιητική προσέγγιση της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη σε αγροτικές πρωτίστως περιοχές της χώρας, καθώς και η ύπαρξη πρότυπων μετεωρολογικών σταθμών είναι ελάχιστη, με αποτέλεσμα τα δεδομένα που συλλέγονται και που χρησιμοποιούνται να μην ικανοποιούν τις απαιτήσεις των μοντέλων και ως εκ τούτου να οδηγούν σε αναξιόπιστες εκτιμήσεις της ET_0 και κατ' επέκταση σε λανθασμένες εφαρμογές άρδευσης (Αλεξανδρής Σ. κ.ά., 2013).

Από την παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψε ότι οι εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_0 με τη μέθοδο FAO56-PM, με τη χρήση ημερήσιων δεδομένων επανάλυσης (ERA5L) είναι σχεδόν 35 % μικρότερες των αντίστοιχων εκτιμήσεων που έδωσε η ίδια μέθοδος με τη χρήση επίγειων δεδομένων (Πίνακας 14). Γενικά και στις υπόλοιπες εμπειρικές μεθόδους παρατηρείται υποεκτίμηση των εκτιμήσεων της ET_0 σε σύγκριση με την πρότυπη μέθοδο FAO56-PM. Οι εκτιμήσεις της ET_0 με τη μέθοδο Hargreaves – Samani, με τη χρήση των δεδομένων επανάλυσης παρουσίασαν την μικρότερη υποεκτίμηση, με ποσοστό 26 %, σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο.

Αντιθέτως, οι εκτιμήσεις της ET_0 , με χρήση επίγειων δεδομένων από τις εμπειρικές μεθόδους εμφάνισαν καλύτερες ποσοστιαίες διαφορές σε σχέση με τη μέθοδο αναφοράς. Συνολικά, η μέθοδος Valiatzas υπερεκτίμησε κατά περίπου 2,4 % της ET_0 σε σύγκριση με τη μέθοδο FAO56-PM και ακολουθεί η μέθοδος Copais με ποσοστό 5,8 %.

Από την ανάλυση των μετεωρολογικών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στις εμπειρικές μεθόδους που μελετήθηκαν, προκύπτει ότι η μεταβλητή της θερμοκρασίας του αέρα (T_{max} , T_{min} & T_{avg}), παρουσιάζει μια αρκετά ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των επίγειων και των δεδομένων επανάλυσης. Παρατηρήθηκε ότι και στις 3 διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές η θερμοκρασία παρουσίασε την ίδια ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των δύο πηγών δεδομένων. Η μεταβλητή που φαίνεται ότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία των εκτιμήσεων της ET_0 είναι η ηλιακή ακτινοβολία (R_s), η οποία εμφανίζει την μικρότερη συσχέτιση. Το ίδιο προκύπτει και από την ανάλυση ευαισθησίας (Κεφάλαιο 5.3).

Από την ανάλυση ευαισθησίας συμπεραίνουμε ότι η μεταβλητή της ηλιακής ακτινοβολίας και της μέσης σχετικής υγρασίας είναι αυτές που επηρεάζουν περισσότερο της εξατμισοδιαπνοή αναφοράς κατά Copais & Valiatzas.

Εν κατακλείδι τα αποτελέσματα αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας έδειξαν ότι από τις εμπειρικές μεθόδους που εξετάστηκαν μόνο η μέθοδος Hargreaves – Samani, μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά και να αποτελέσει εργαλείο εκτίμησης της ET_0 . Γενικά η μέθοδος Hargreaves – Samani είναι αρκετά δημοφιλής και ευρέως διαδεδομένη στην επιστημονική κοινότητα λόγω των ελάχιστων απαιτήσεων σε μετεωρολογικά δεδομένα.

Σε σχέση με τα δεδομένα και τις μετεωρολογικές μεταβλητές που μελετήθηκαν με βάση την πηγή προέλευσης τους (επίγεια και επανάλυσης δεδομένα) προκύπτει ότι τα δεδομένα επανάλυσης ERA5-Land δεν μπορούν πλήρως να αντικαταστήσουν τα επίγεια δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς. Την χειρότερη συσχέτιση την εμφανίζει η ηλιακή ακτινοβολία και ακολουθεί η σχετική υγρασία. Αντιθέτως οι τιμές θερμοκρασίας εμφανίζουν μια αρκετά έως και άριστη συσχέτιση σε σύγκριση με τα επίγεια δεδομένα. Μπορούμε να αναφέρουμε ότι όντως οι τιμές της θερμοκρασίας (T_{min} , T_{max} & T_{avg}) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να αντικαταστήσουν επίγεια δεδομένα.

Τέλος, αυτό που προτείνεται είναι η περαιτέρω και σε βάθος έρευνα με τη χρήση μεγαλύτερων χρονοσειρών επίγειων δεδομένων και σε διαφορετικές περιοχές της Ελλάδας με διαφορετικές κλιματικές συνθήκες, προκειμένου να προκύψουν πιο ακριβείς προσεγγίσεις της ET_0 καθώς και να αξιολογηθούν οι εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού της ET_0 . Επιπλέον τότε θα μπορούσαμε να έχουμε καλύτερη και ακριβέστερη εικόνα αναφορικά με τα δεδομένα επανάλυσης ERA5-Land και κατά πόσο τελικά θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τα επίγεια μετεωρολογικά δεδομένα.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

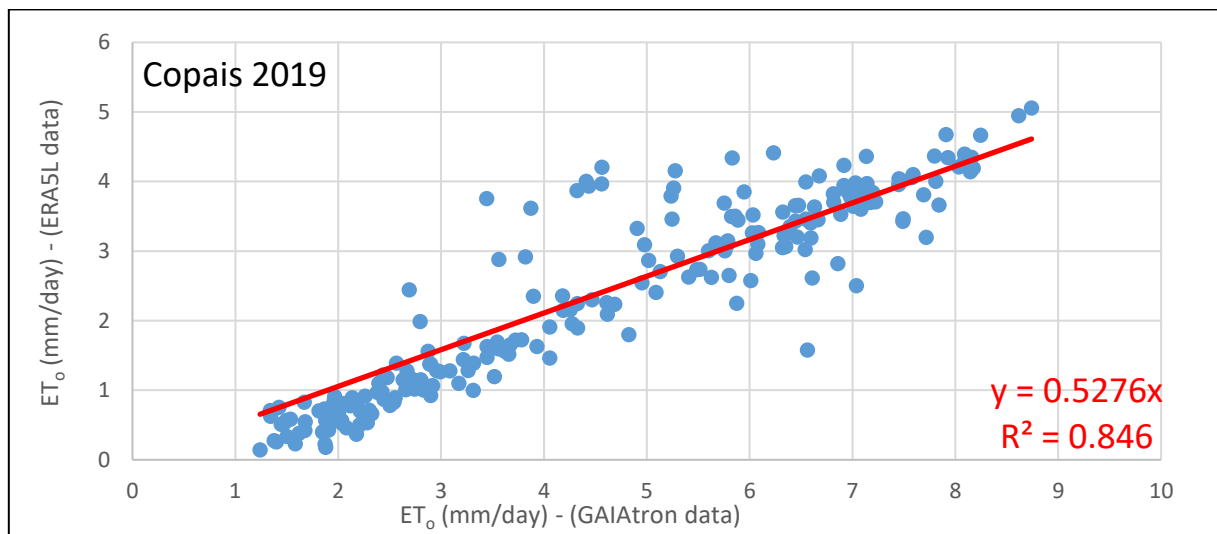
- Aditya Abha Singh, Arvind K. Singh, in *Water Conservation in the Era of Global Climate Change*, 2021.
- Alexandris, S., Kerkides, P., & Liakatas, A. (2006). *Daily reference evapotranspiration estimates by the “ Copais ” approach*. 82, 371–386. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.08.001>
- Allen, R. G. (2000). *Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study*. 229, 27–41.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 - Crop Evapotranspiration*. March.
- Ambas, V. T., & Baltas, E. (2012). Sensitivity analysis of different evapotranspiration methods using a new sensitivity coefficient. *Global Nest Journal*, 14(3), 335–343. <https://doi.org/10.30955/gnj.000882>
- Australian Academy of Science. (2015). The science of climate change: Questions and answers. *Australian Academy of Science, february*. <https://www.science.org.au/learning/general-audience/science-booklets-0/science-climate-change>
- Battisti, R. (2018). *Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. Wmo 1989*.
- Calera, A., Campos, I., Osann, A., Urso, G. D., & Menenti, M. (n.d.). *Remote Sensing for Crop Water Management : From ET Modelling to Services for the End Users*. 1–25. <https://doi.org/10.3390/s17051104>
- Calibration, I., Model, M., Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). *Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration With Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration „ METRIC ... — Model. 9437*(May 2014). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133)
- Cha, Y., Park, S. S., Kim, K., Byeon, M., & Stow, C. A. (2014). *Water Resources Research*. 5375–5377. <https://doi.org/10.1002/2013WR014979.Reply>
- Chirico, G. B., Medina, H., & Romano, N. (2010). Geoderma Functional evaluation of PTF prediction uncertainty : An application at hillslope scale. *Geoderma*, 155(3–4), 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.008>
- Consoli, S., & Vanella, D. (2014). Mapping crop evapotranspiration by integrating vegetation indices into a soil water balance model. *Agricultural Water Management*, 143, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.06.012>
- David Pimentel*, Bonnie Berger#, D., Filiberto, Michelle Newton, B. W., Elizabeth Karabinakis, Steven Clark, E. P., & Elizabeth Abbett, and S. N. (2004). Water resources, irrigated agriculture and the environment. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental e Ambiental*, 4(3).
- Douville, H., K. Raghavan, J. Renwick, R.P. Allan, P.A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T.Y. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, and O. Z. (2021). *Water Cycle Changes. In Climate Change 2021: The Physical Science*

- Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.010.1055>*
- George H. Hargreaves, & Zohrab A. Samani. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Gonzalez-dugo, M. P., Neale, C. M. U., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Anderson, M. C., & Li, F. (2009). *Agricultural and Forest Meteorology A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration*. 149, 1843–1853. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.012>
- Iglesias, A., & Garrote, L. (2015). Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. *Agricultural Water Management*, 155, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.014>
- Koutsoyiannis, D. (2016). *Τεχνική Υδρολογία (Engineering Hydrology)* (Issue August). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4856.0888>
- Kustas, W. P., & Norman, J. M. (2009). *Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces*. 6667. <https://doi.org/10.1080/02626669609491522>
- Lewis, C. S., Geli, H. M. E., & Neale, C. M. U. (2014). Comparison of the NLDAS Weather Forcing Model to Agrometeorological Measurements in the western United States. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 510, 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.040>
- Moore, F. C., & Lobell, D. B. (2014). *Adaptation potential of European agriculture in response to climate change*. May, 1–5. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2228>
- Muñoz Sabater, J., 2019. ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 18 July 2020), <https://doi:10.24381/cds.e2161bac>.
- Mu, Q., Heinsch, F. A., Zhao, M., & Running, S. W. (2007). *Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data*. 111, 519–536. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.007>
- Parliament, T. H. E. E., Council, T. H. E., The, O. F., & Union, E. (2020). 20.12.2013. 1305.
- Pelosi, A., & Chirico, G. B. (2021). Regional assessment of daily reference evapotranspiration: Can ground observations be replaced by blending ERA5-Land meteorological reanalysis and CM-SAF satellite-based radiation data? *Agricultural Water Management*, 258(September). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107169>
- Pelosi, Anna, Terribile, F., & Urso, G. D. (2020). *Comparison of ERA5-Land and UERRA MESCAN-SURFEX Reanalysis Data with Spatially Interpolated Weather Observations for the Regional Assessment of Reference Evapotranspiration*.
- Pereira, L S, Perrier, A., Allen, R. G., & Alves, I. (1996). *Evapotranspiration: Review of concepts and future trends*. January.
- Pereira, Luis S, Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural*

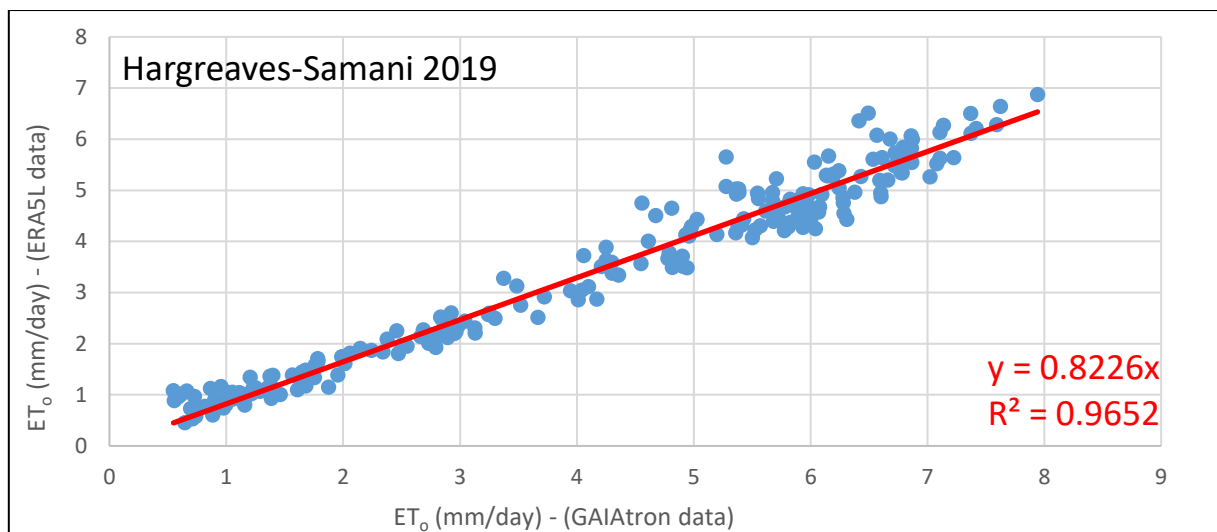
- Water Management*, 108, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.022>
- Pereira, Luis Santos. (2017). *Water , Agriculture and Food : Challenges and Issues. November 2016*. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1664-z>
- Rodda, J. C. (2004). World water resources at the beginning of the twenty-first century. *Choice Reviews Online*, 41(07), 41-4063-41–4063. <https://doi.org/10.5860/choice.41-4063>
- Shiklomanov IA. (1993). *Water_in_Crisis_Chapter_2_Oxford_Univers.pdf* (pp. 13–23).
- Soci, C., Bazile, E., Besson, F. O., & Landelius, T. (2016). High-resolution precipitation re-analysis system for climatological purposes. *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68(1). <https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.29879>
- Strong, C., Khatri, K. B., Kochanski, A. K., Lewis, C. S., & Allen, L. N. (2017). Reference evapotranspiration from coarse-scale and dynamically downscaled data in complex terrain: sensitivity to interpolation and resolution. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.045>
- Valiantzas, J. D. (2013). *Simple ET O Forms of Penman ' s Equation without Wind and / or Humidity Data . II : Comparisons with Reduced Set-FAO and Other Methodologies. January*, 9–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000502](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000502).
- Αλεξανδρής Σ., Πρόυτσος Ν., Καραβίτης Χ., Τσίρος Ι., Σ. Δ. (2013). ΛΟΓΟΙ ΕΣΦΑΛΜΕΝΗΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ. 8ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής. Βόλος, 110–116.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017b). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής (EL06). http://wfdver.ypeka.gr/wp-content/uploads/2017/12/EL06_SDLAP_APPROVED.pdf
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017b). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (EL08). http://wfdver.ypeka.gr/wp-content/uploads/2017/12/EL08_SDLAP_APPROVED.pdf
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2017b). 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Θράκης (EL12). http://wfdver.ypeka.gr/wp-content/uploads/2017/12/EL12_SDLAP_APPROVED.pdf
- Σταματάκος, Δ., Βασιλάκου, Κ., Γκώτσης, Ι., Φασούλη, Β., & Βιτωράτος, Η. (2016). ΕΞΑΤΜΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ CONTRIBUTION OF EMPIRICAL METHODS AND SATELLITE DATA USE FOR ESTIMATING DAILY REFERENCE. 72–84.

Παράρτημα Α

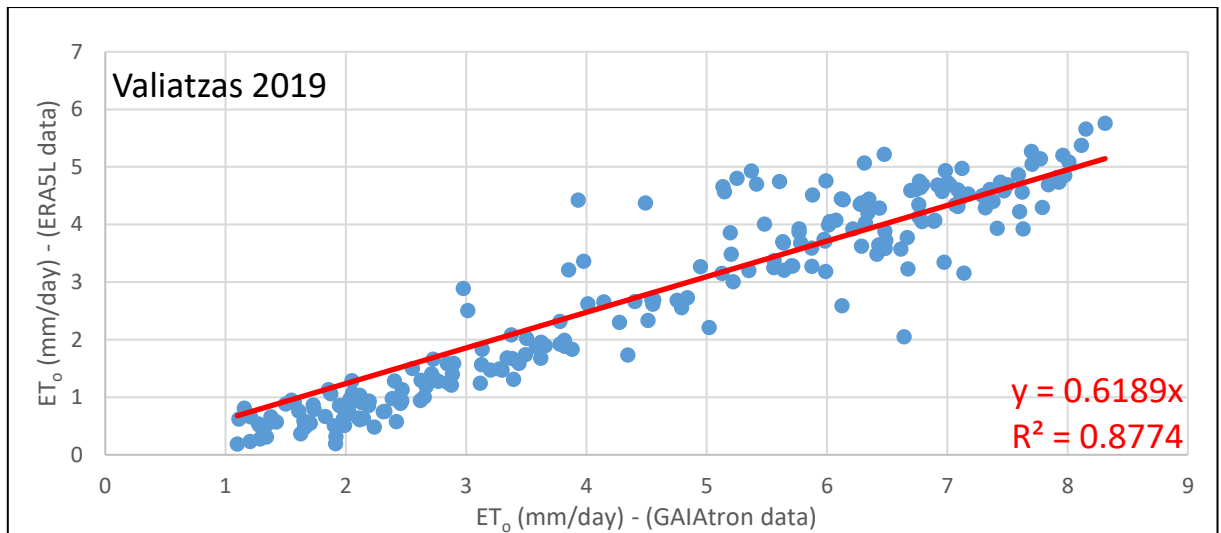
Λάρισα 2019



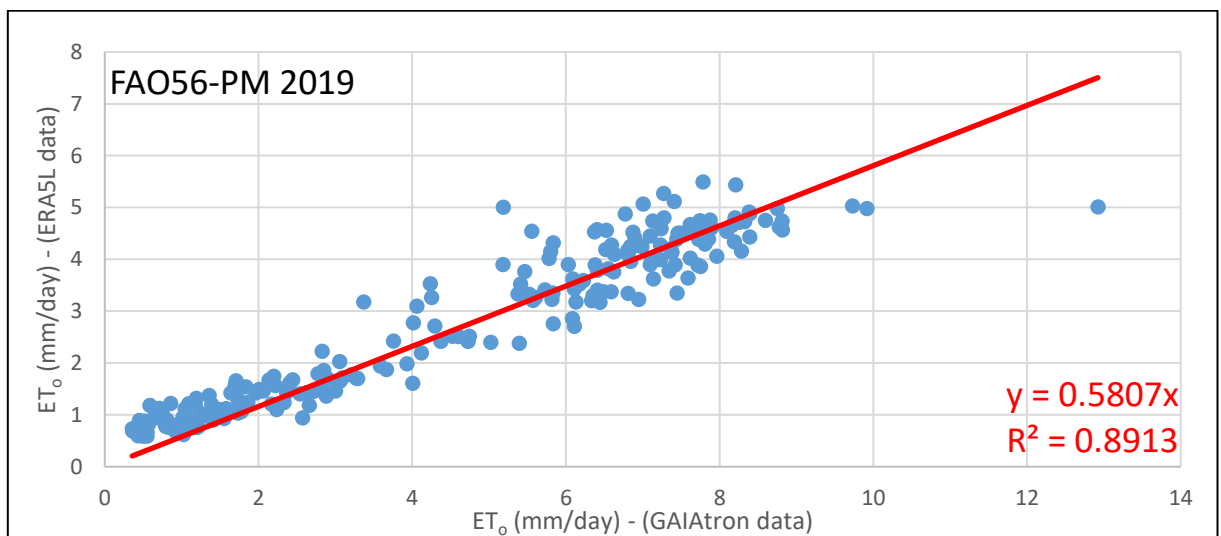
Εικόνα 33. Λάρισα 2019 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



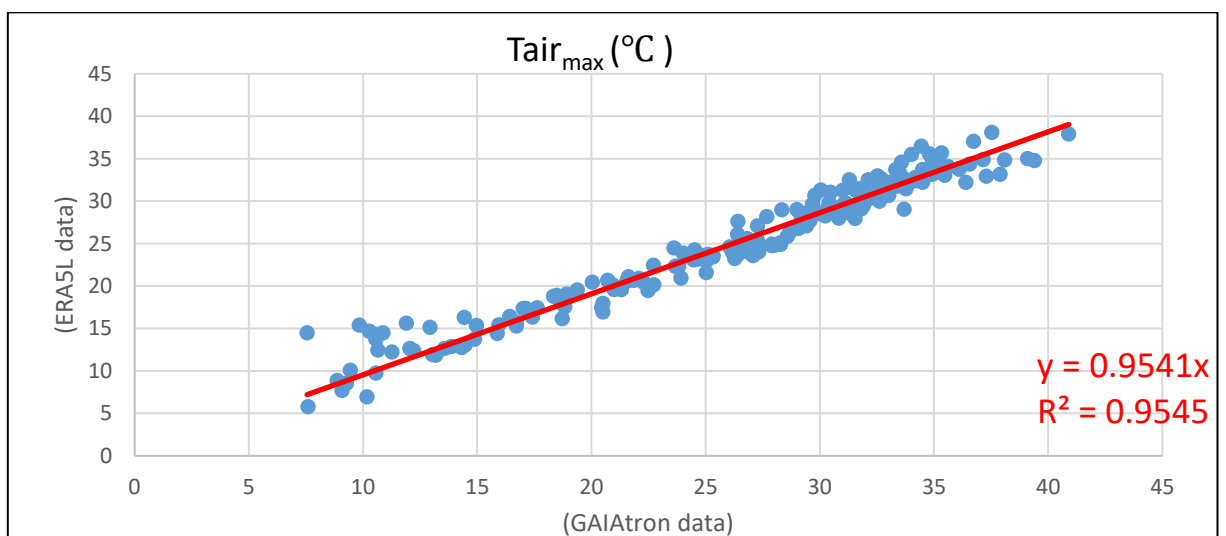
Εικόνα 34. Λάρισα 2019 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



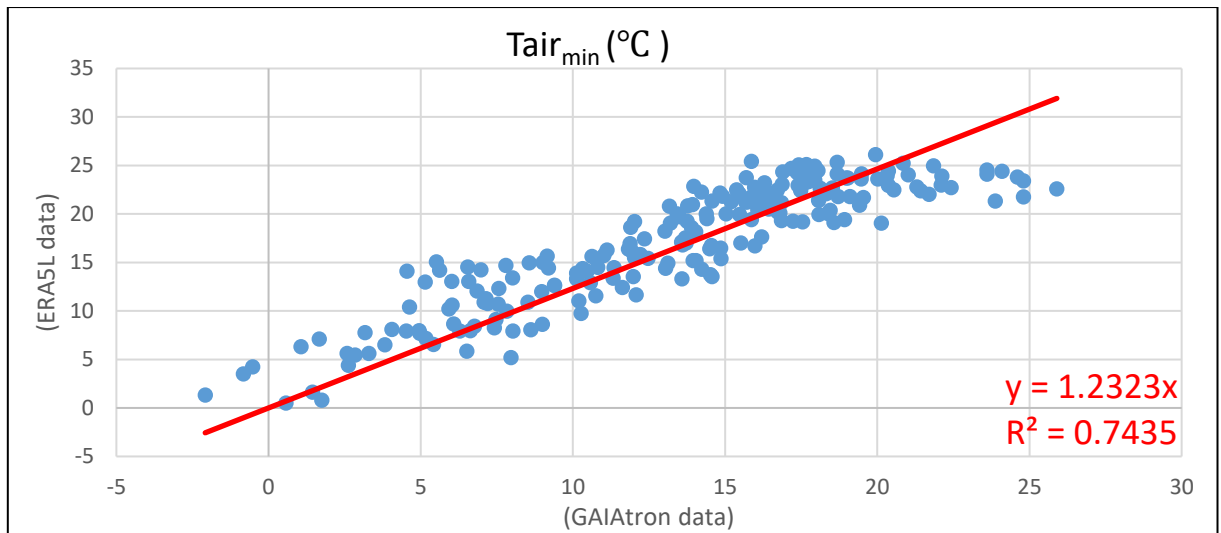
Εικόνα 35. Λάρισα 2019 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



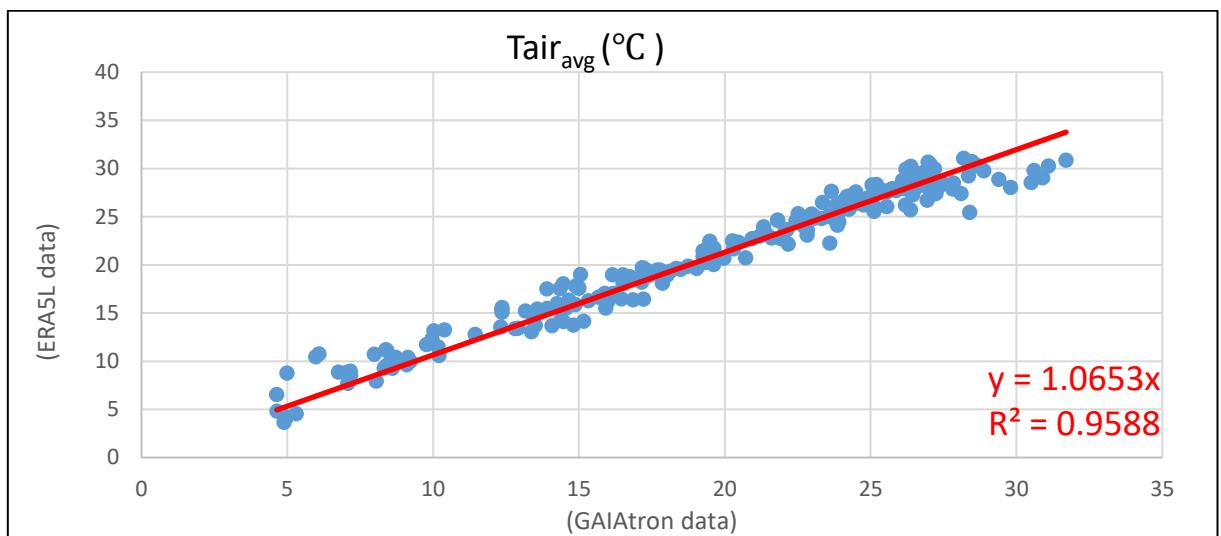
Εικόνα 36. Λάρισα 2019 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



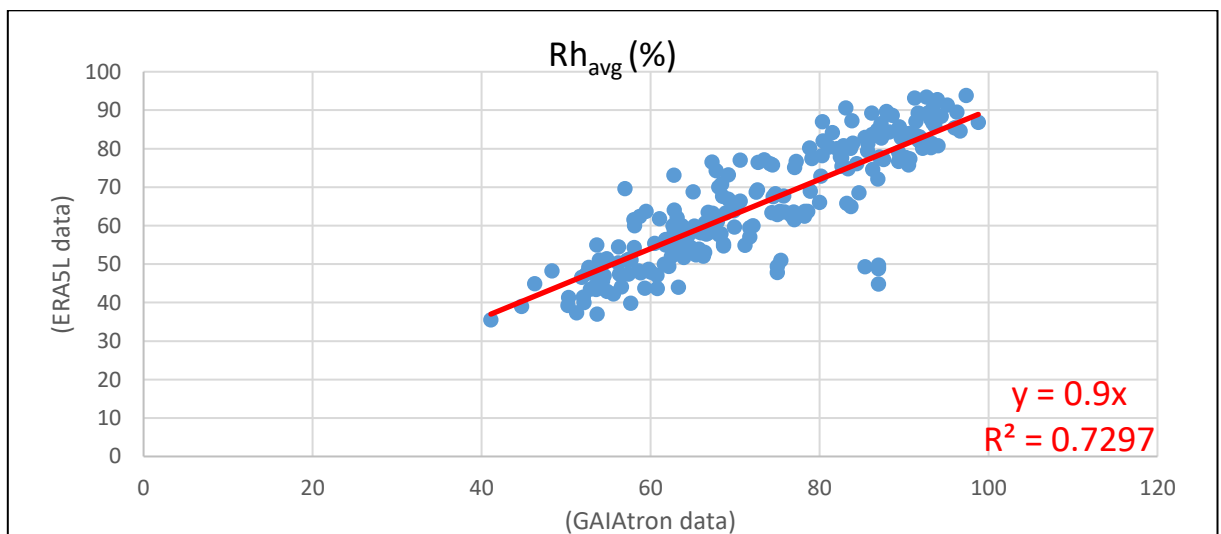
Εικόνα 37. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Tair_{max} ανά πηγή δεδομένων.



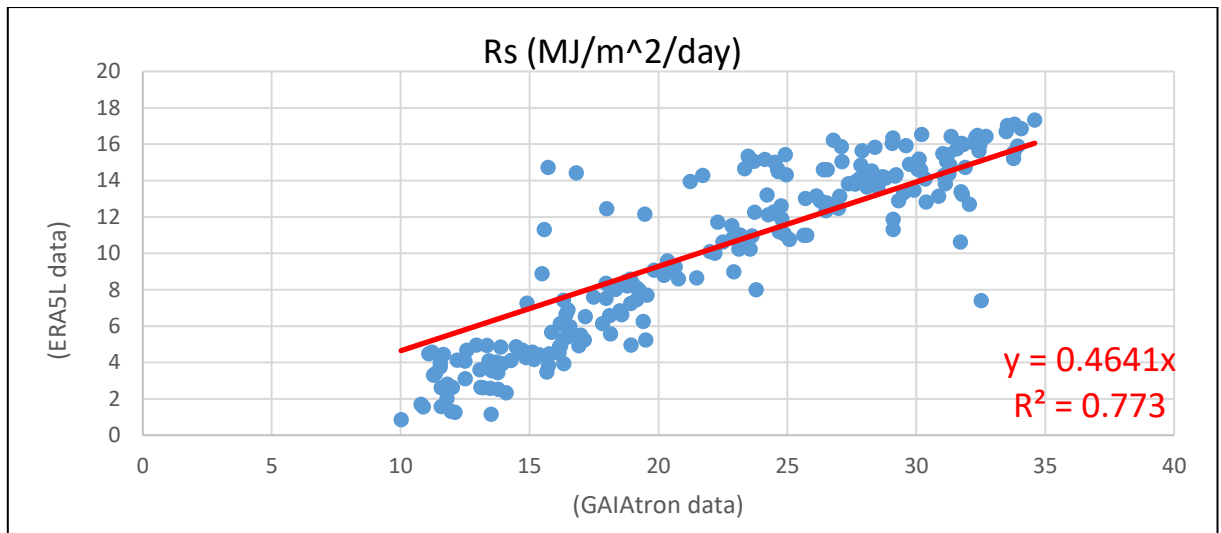
Εικόνα 38. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{mix}}$ ανά πηγή δεδομένων.



Εικόνα 39. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{avg}}$ ανά πηγή δεδομένων.

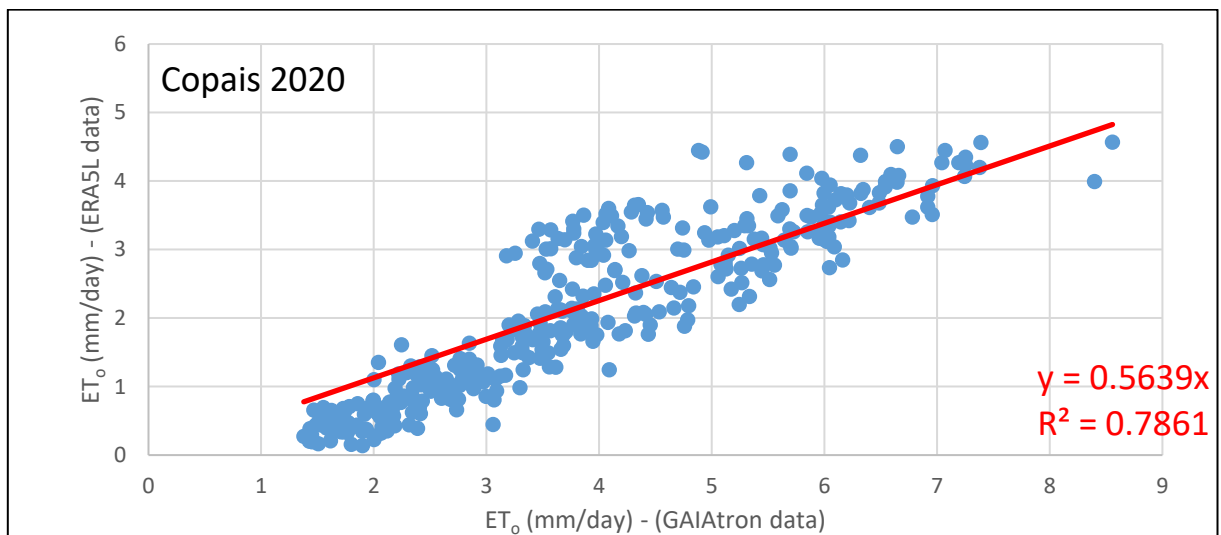


Εικόνα 40. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου RH_{avg} ανά πηγή δεδομένων.

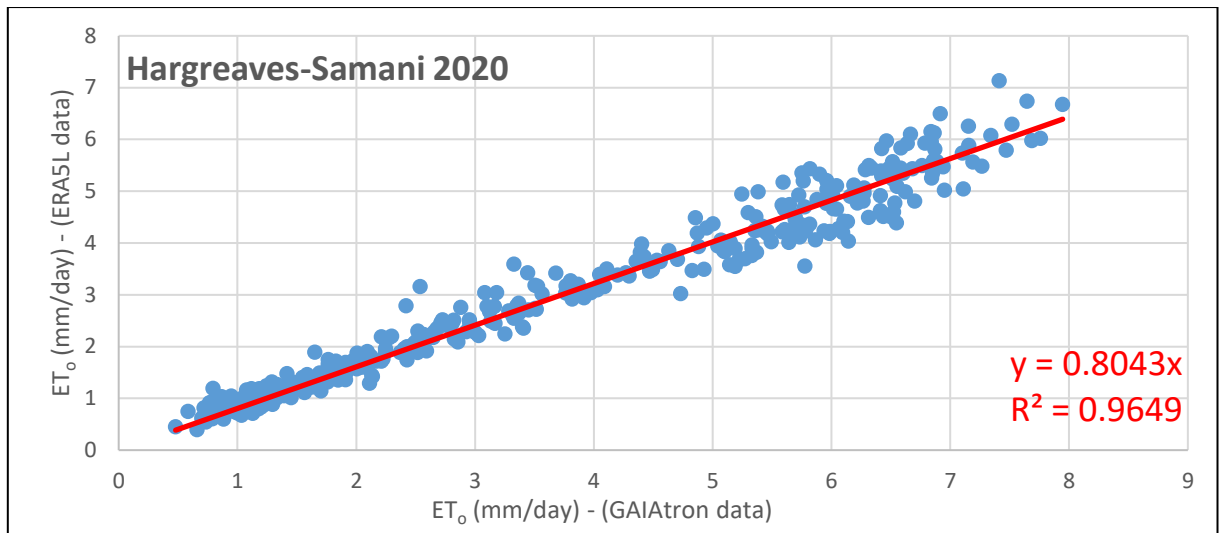


Εικόνα 41. Λάρισα 2019 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Rs ανά πηγή δεδομένων.

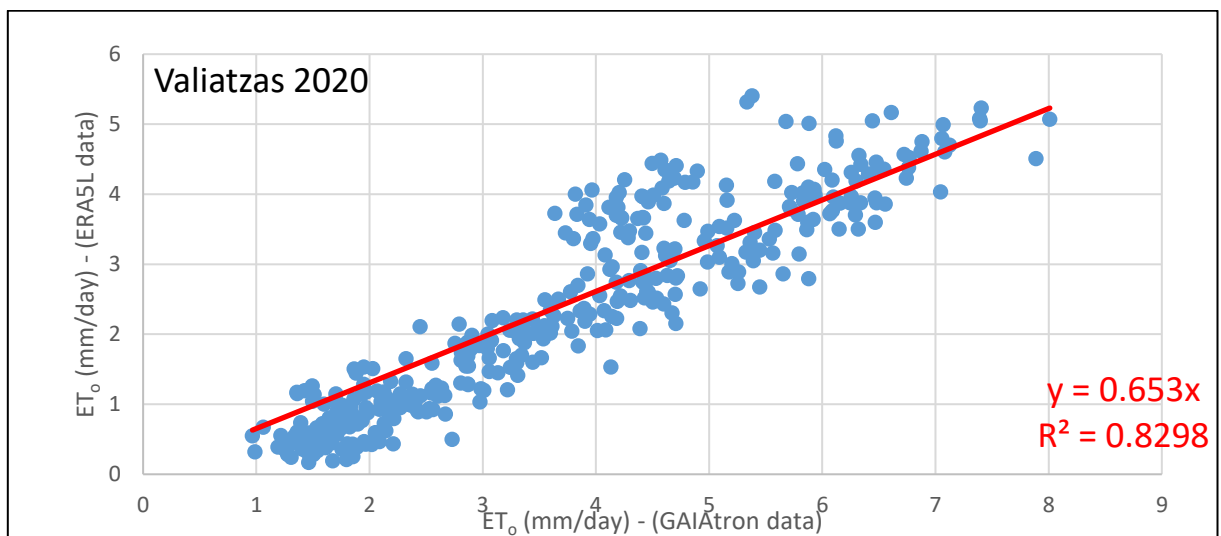
Λάρισα 2020



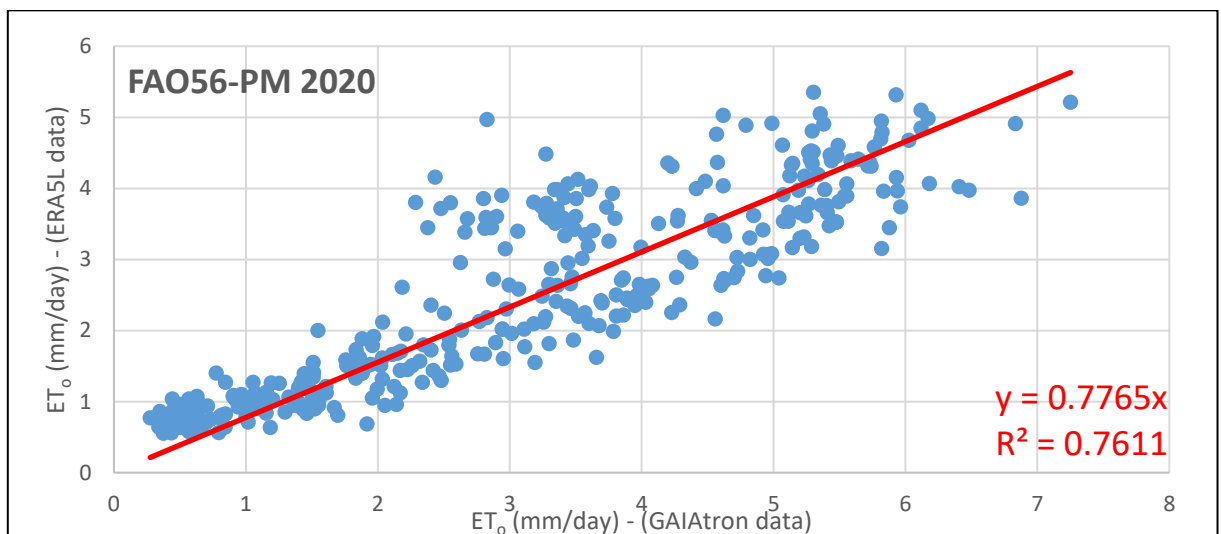
Εικόνα 42. Λάρισα 2020 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



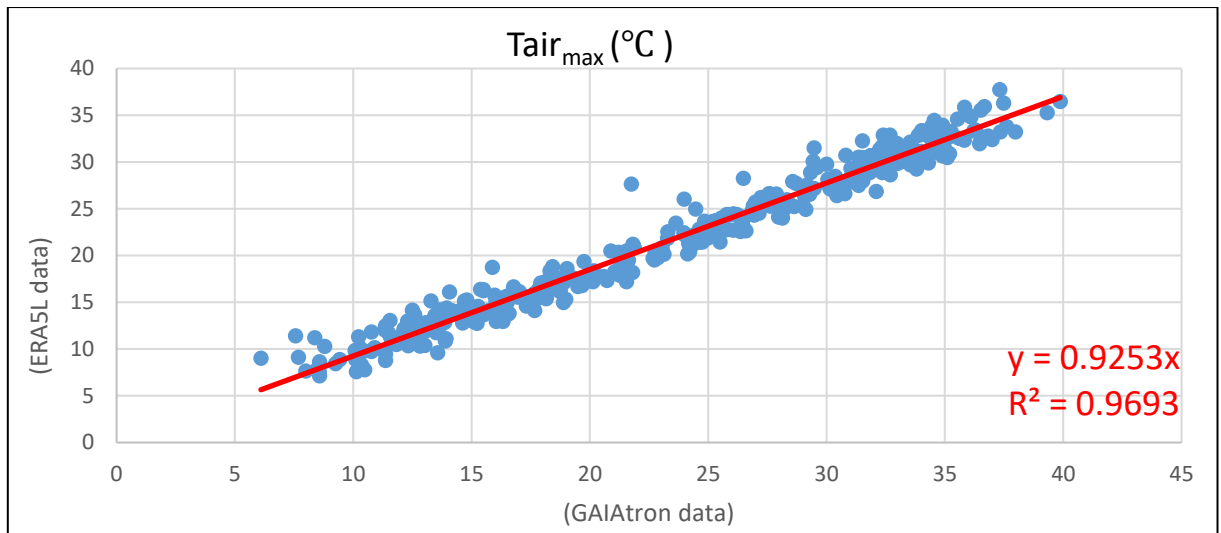
Εικόνα 43. Λάρισα 2020 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



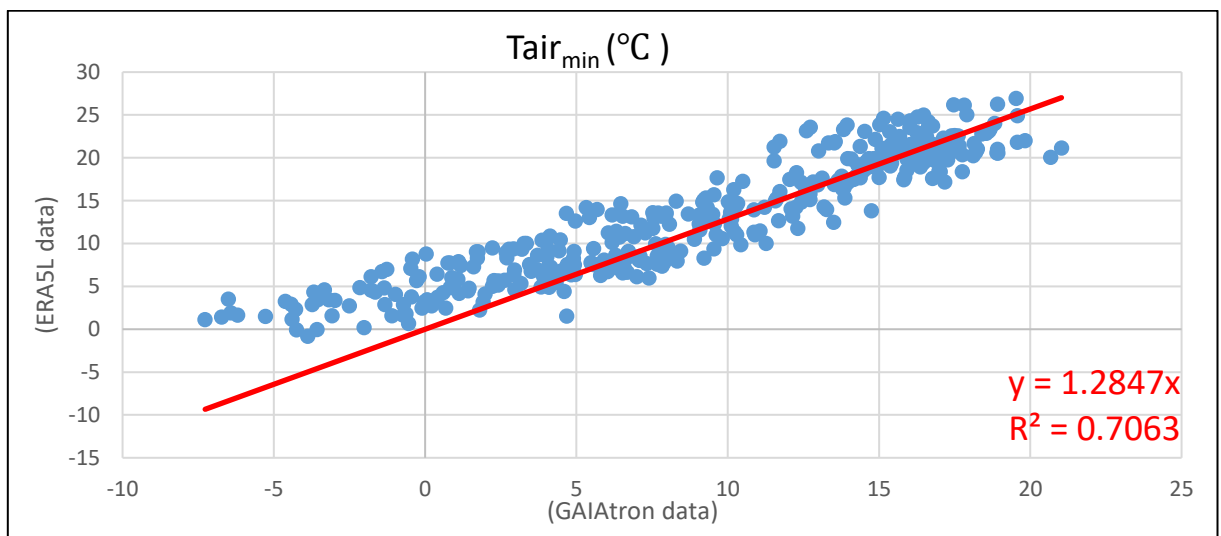
Εικόνα 44. Λάρισα 2020 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



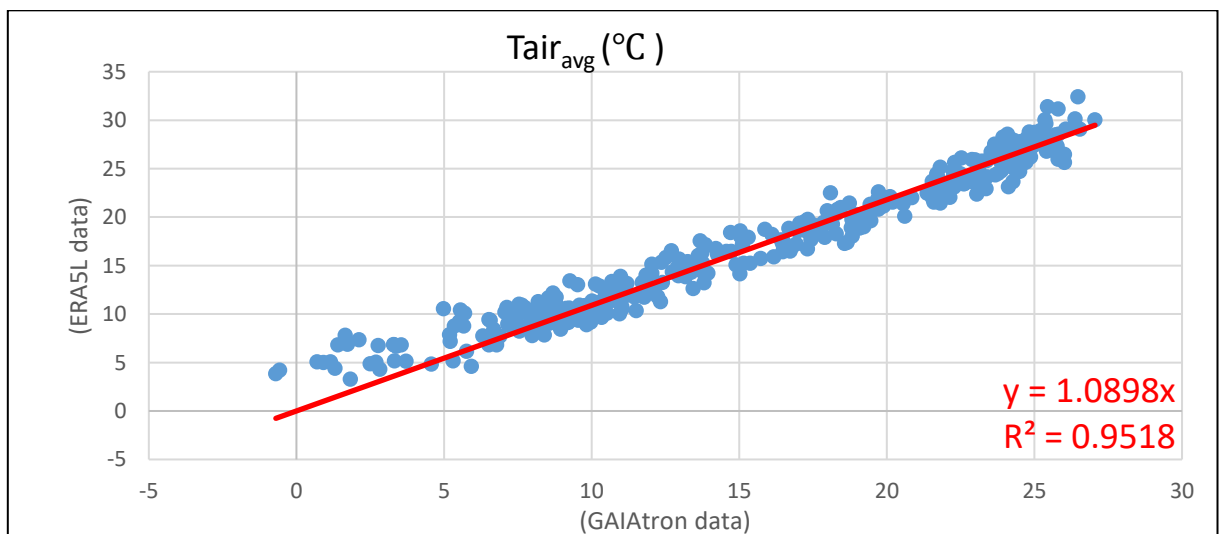
Εικόνα 45. Λάρισα 2020 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



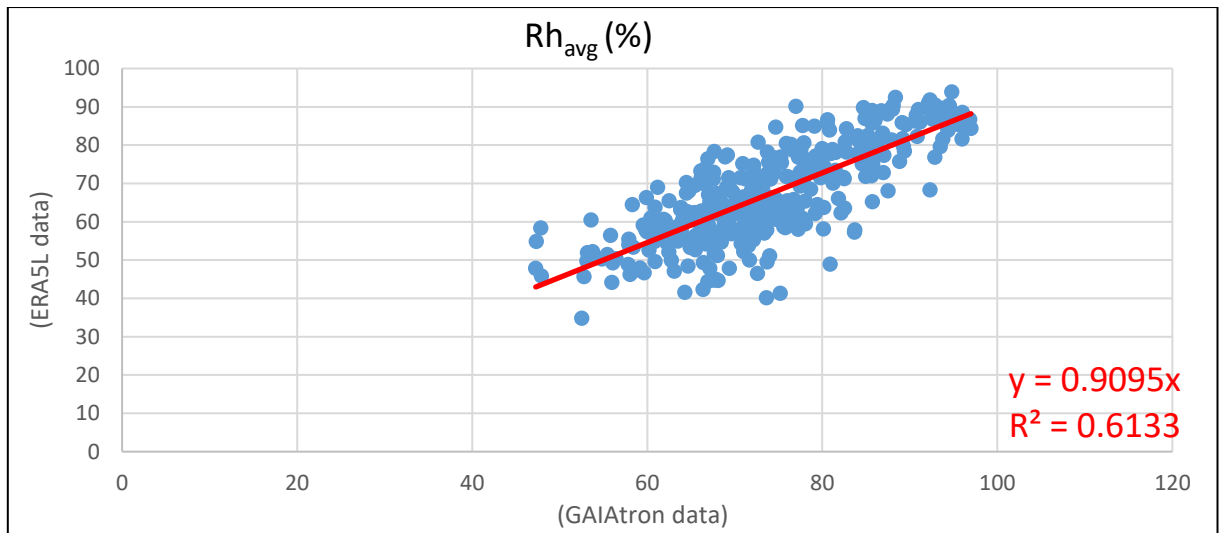
Εικόνα 46. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{max}$ ανά πηγή δεδομένων.



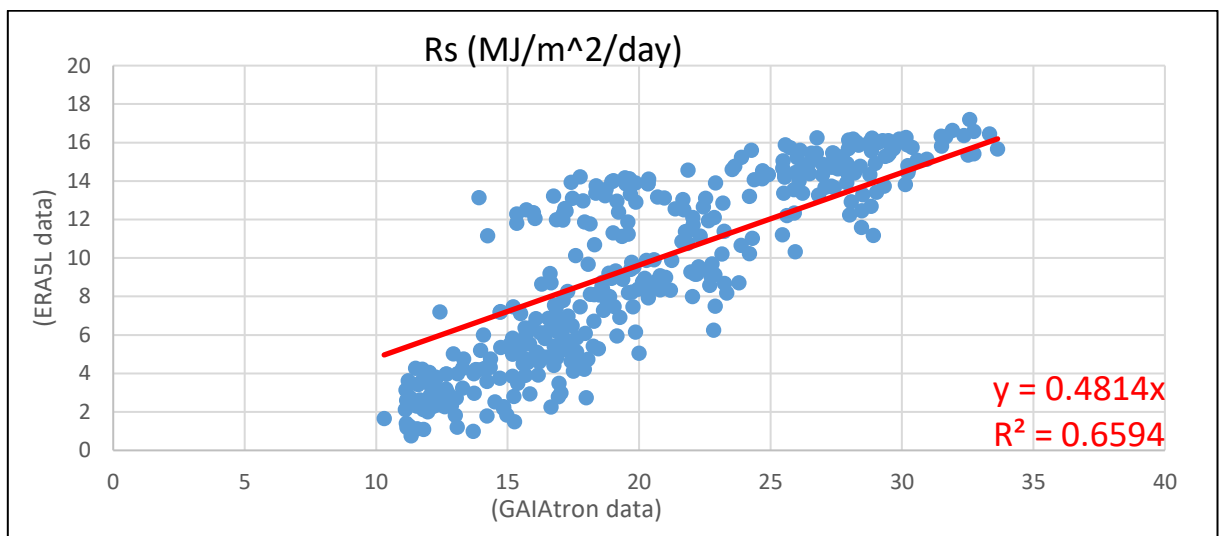
Εικόνα 47. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{min}$ ανά πηγή δεδομένων.



Εικόνα 48. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{avg}$ ανά πηγή δεδομένων.

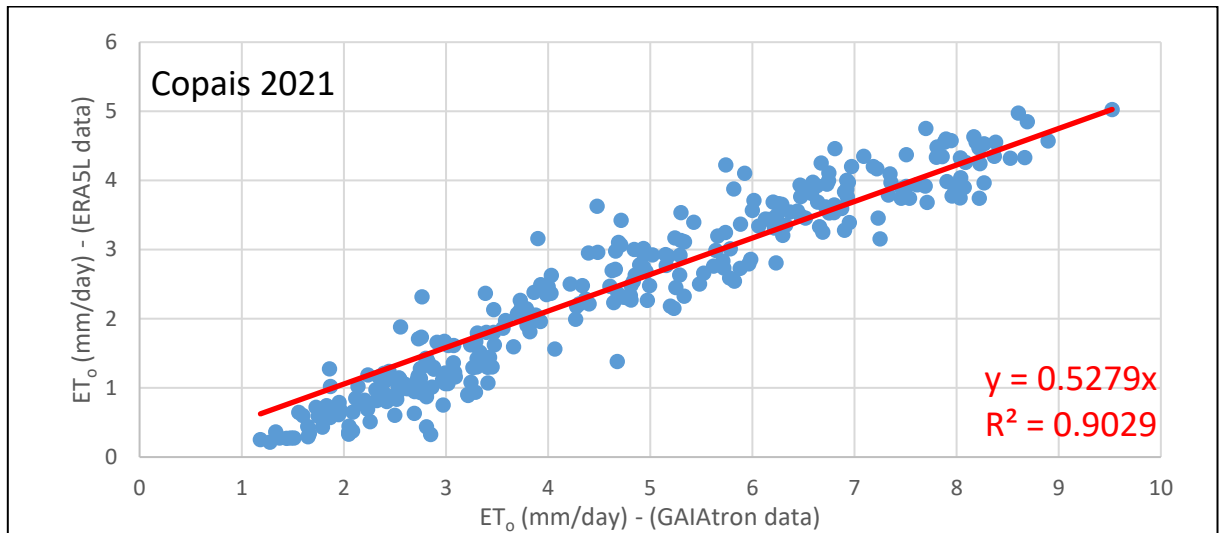


Εικόνα 49. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Rh_{avg} ανά πηγή δεδομένων.

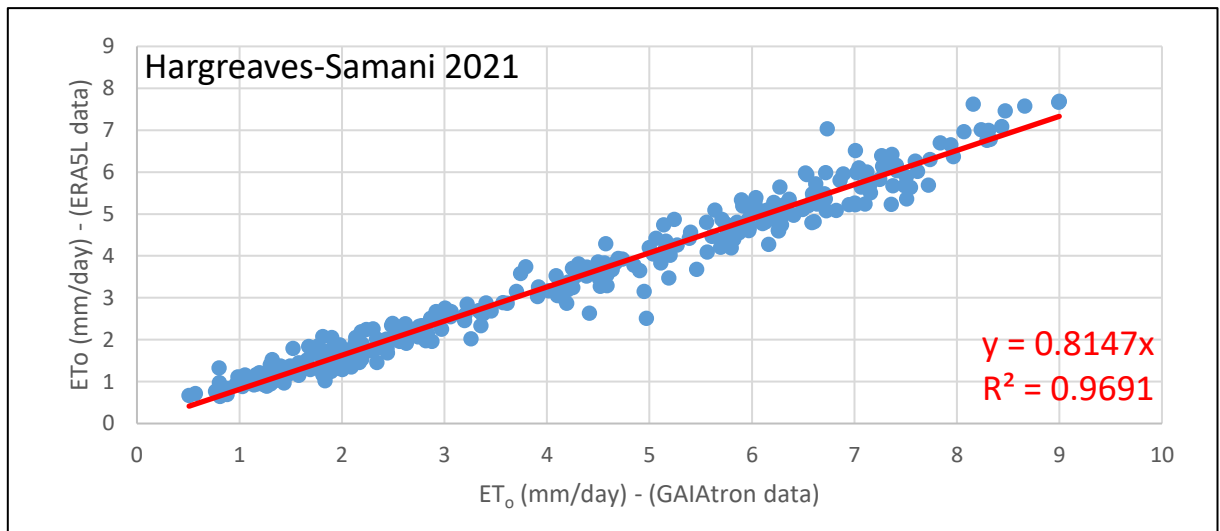


Εικόνα 50. Λάρισα 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Rs ανά πηγή δεδομένων.

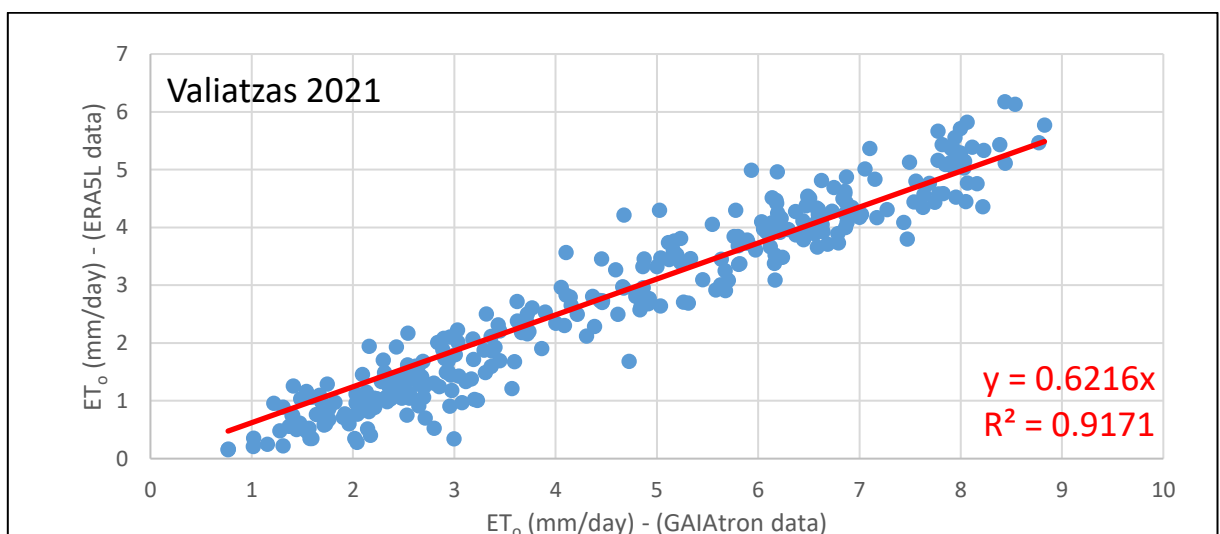
Λάρισσα 2021



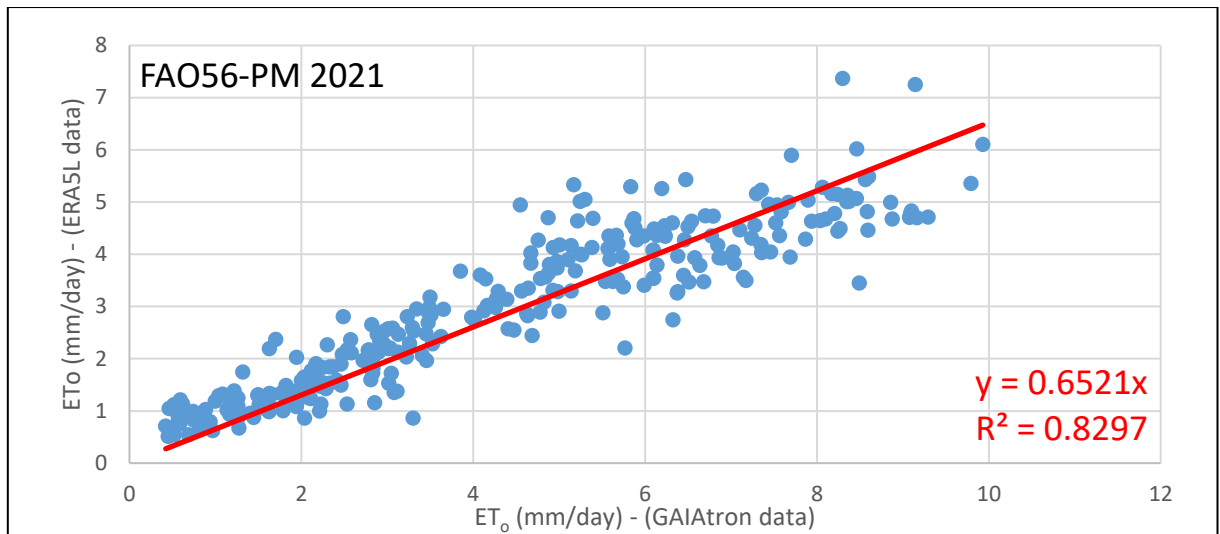
Εικόνα 51. Λάρισσα 2021 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



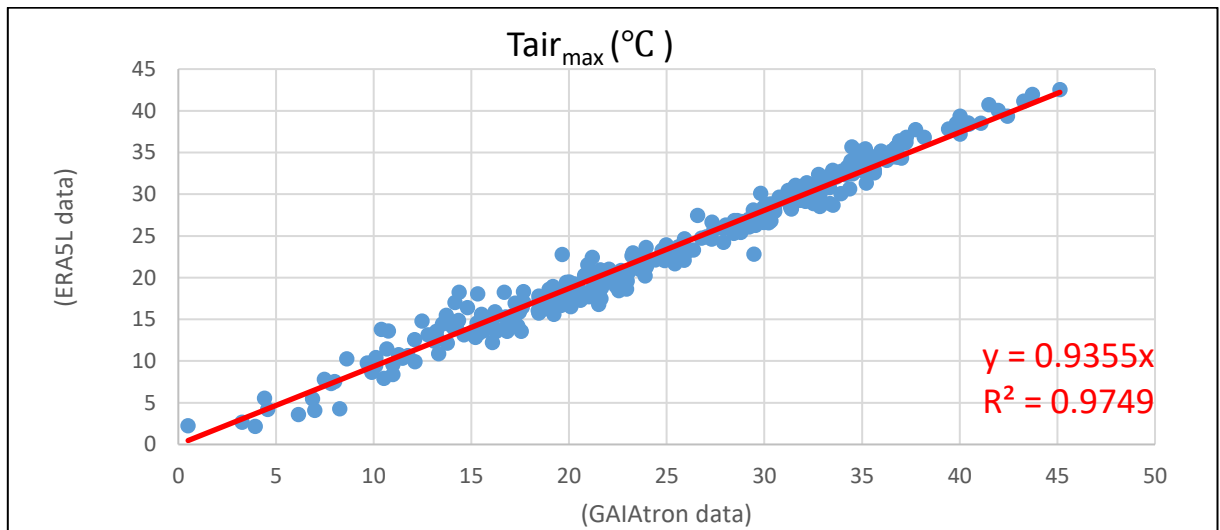
Εικόνα 52. Λάρισσα 2021 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



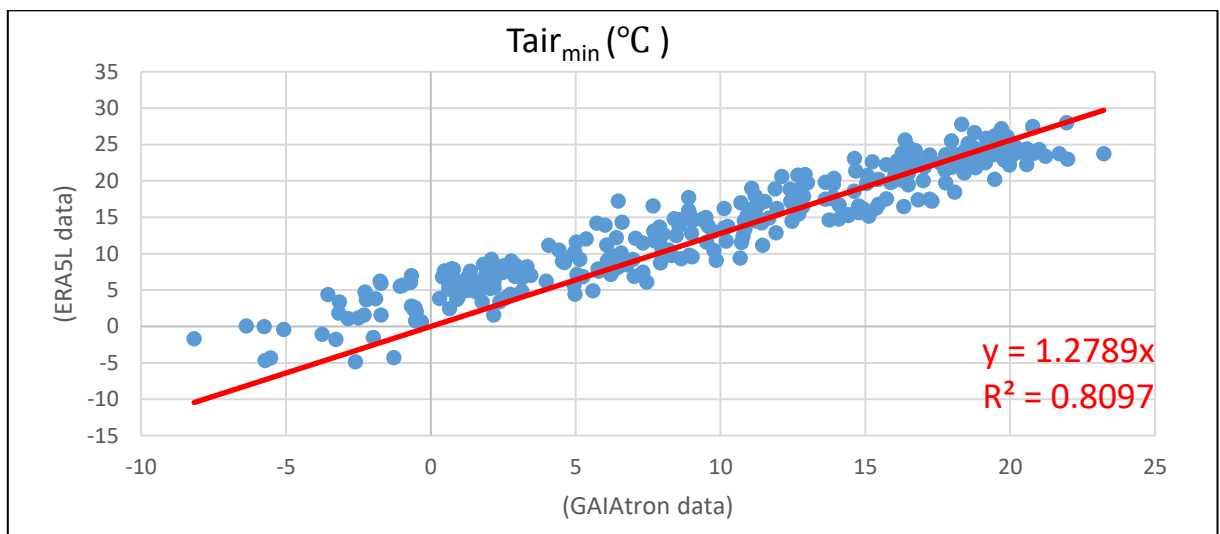
Εικόνα 53. Λάρισα 2021 –Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



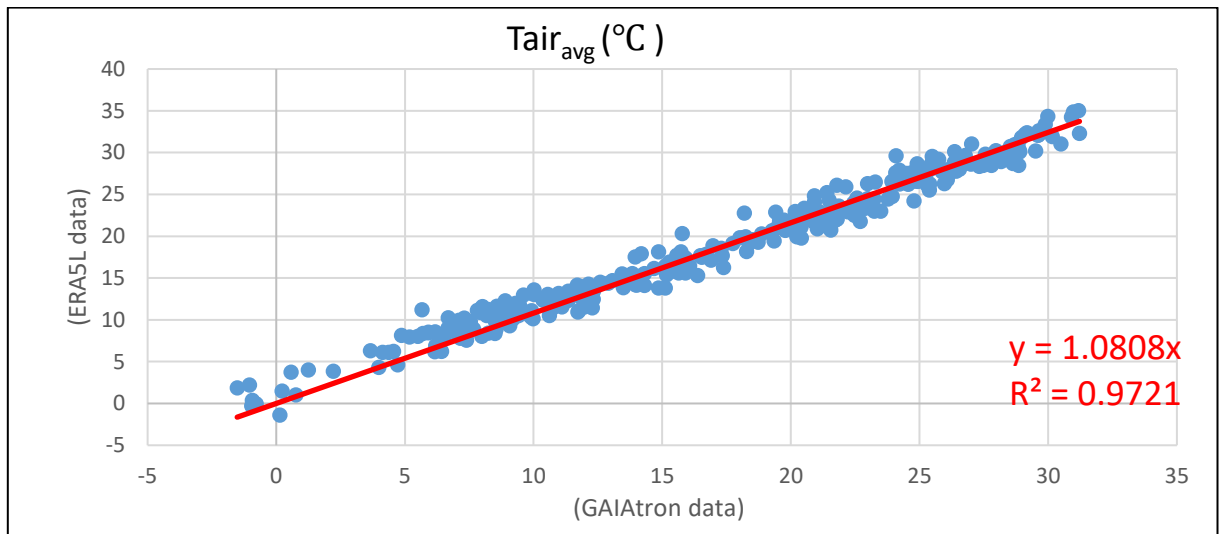
Εικόνα 54. Λάρισα 2021 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



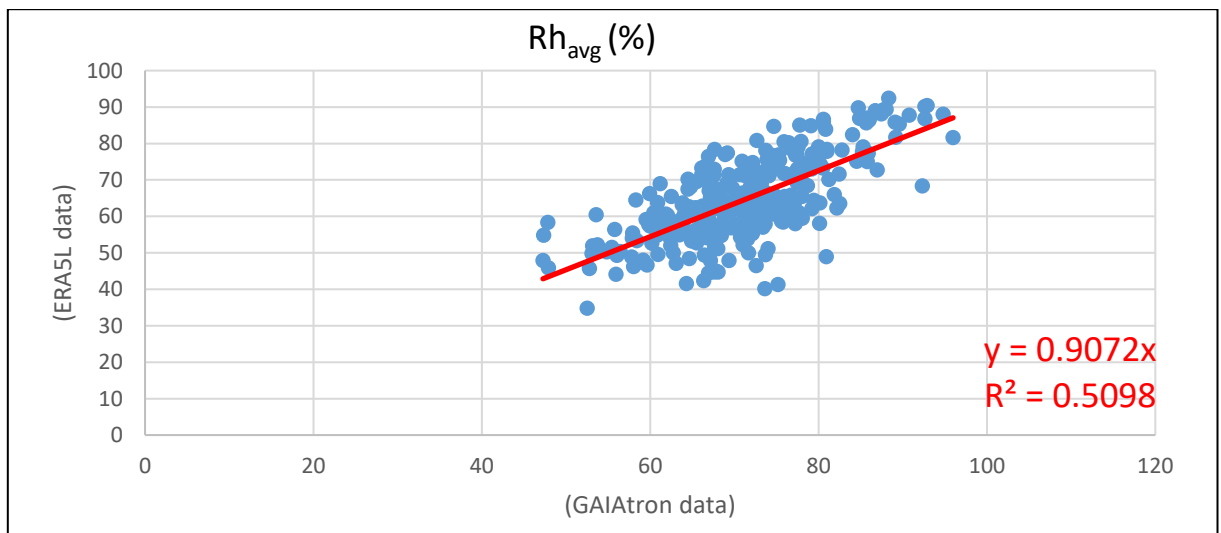
Εικόνα 55. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Tair_{max} ανά πηγή δεδομένων.



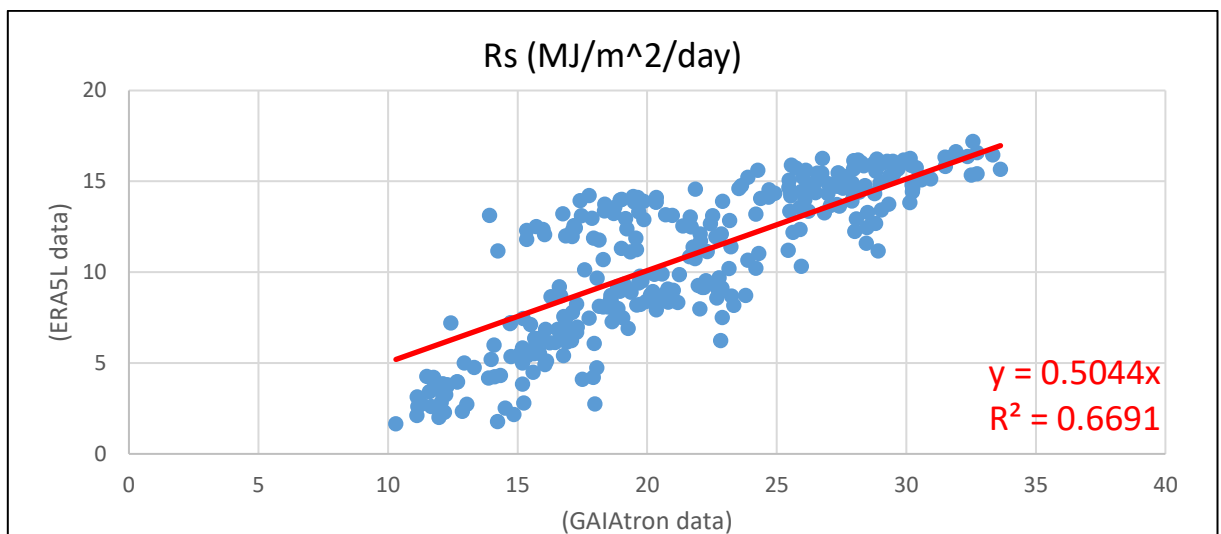
Εικόνα 56. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Tair_{mix} ανά πηγή δεδομένων.



Εικόνα 57. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου T_{air_avg} ανά πηγή δεδομένων.

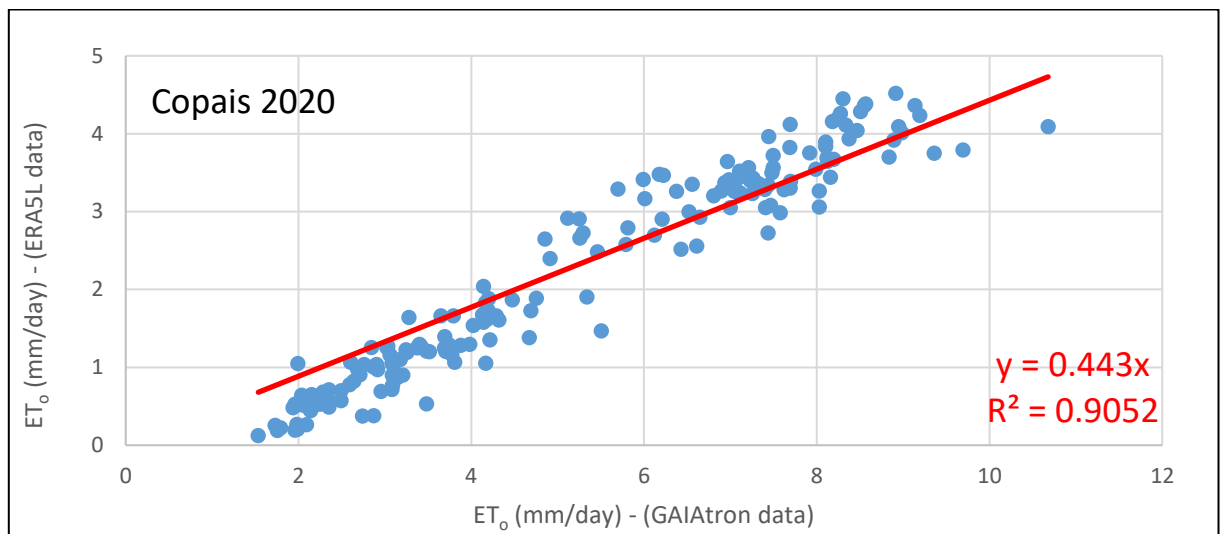


Εικόνα 58. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Rh_{avg} ανά πηγή δεδομένων.

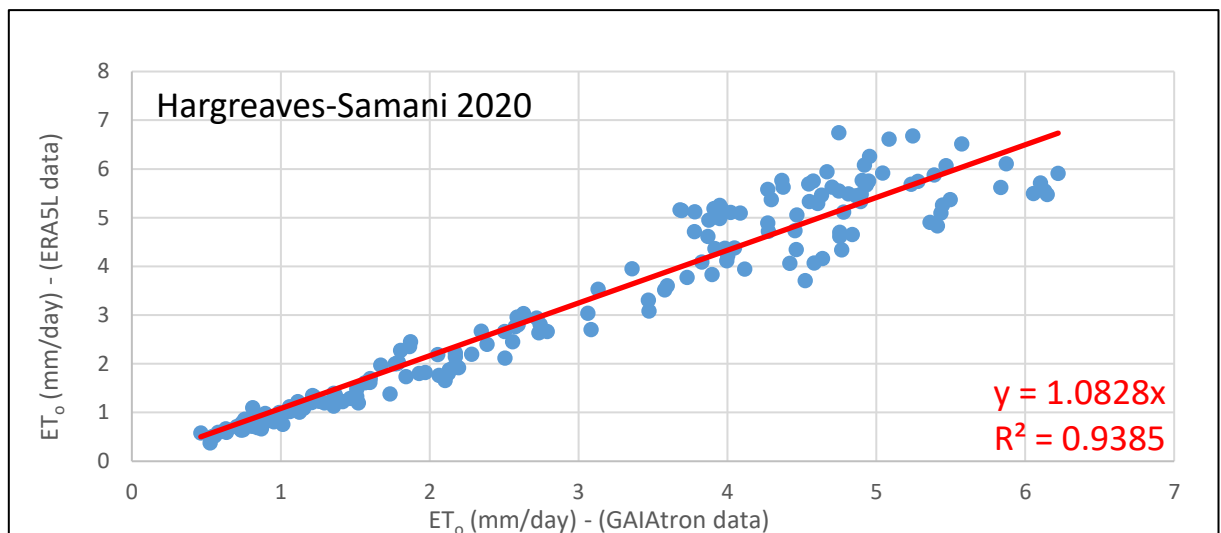


Εικόνα 59. Λάρισα 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου R_s ανά πηγή δεδομένων.

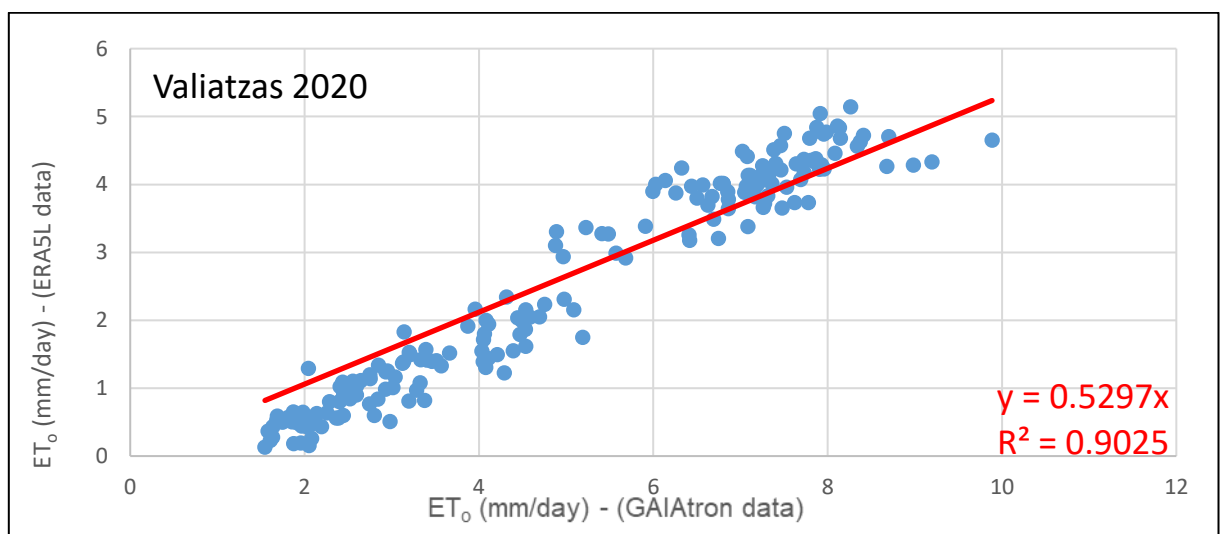
Κομοτηνή 5.1 2020



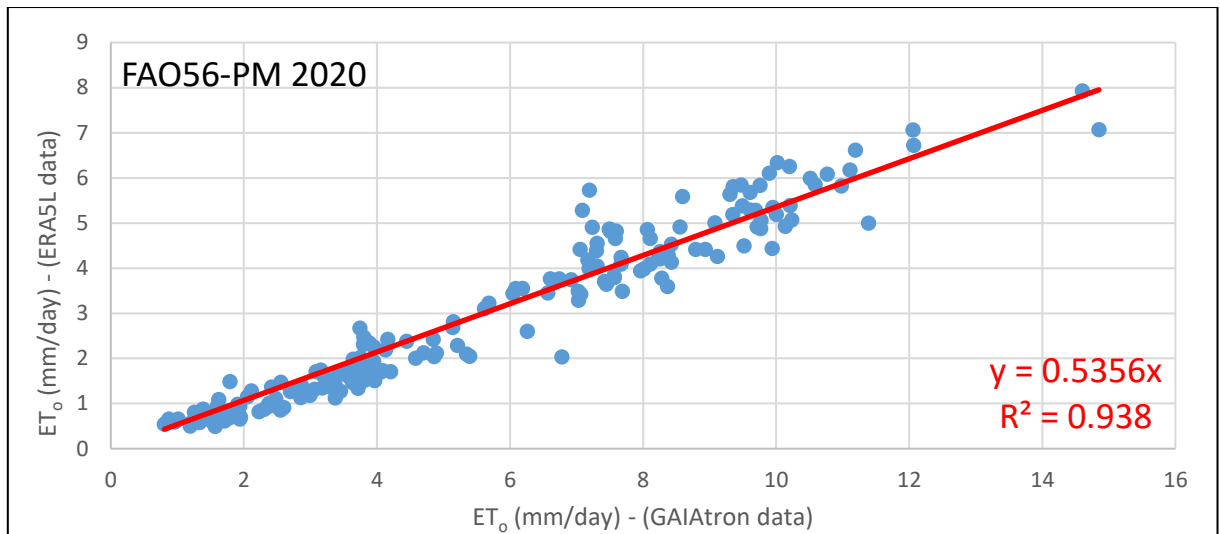
Εικόνα 608. Κομοτηνή 5.1 2020 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



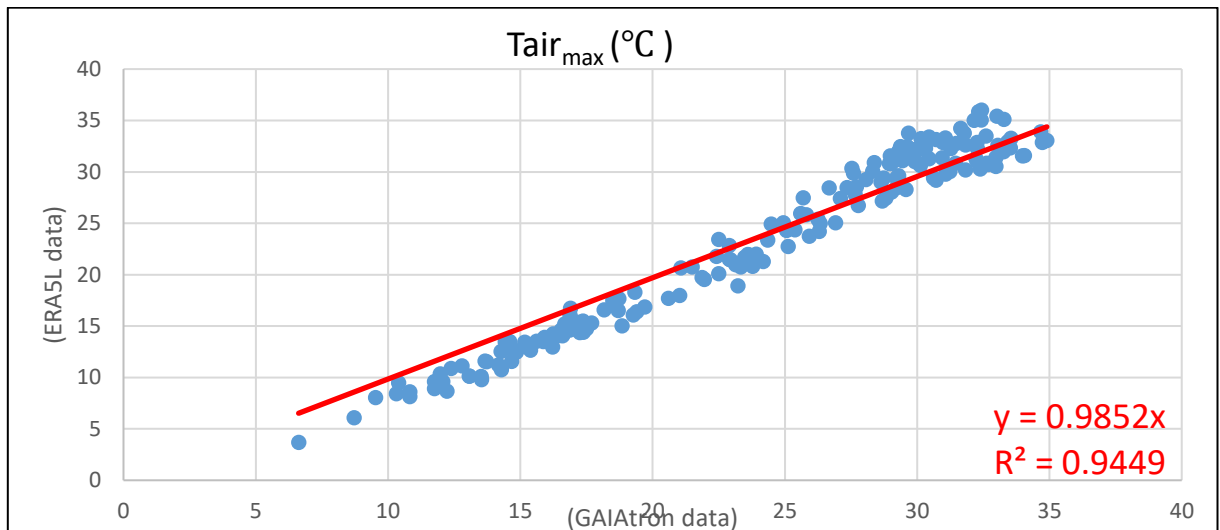
Εικόνα 619. Κομοτηνή 5.1 2020 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



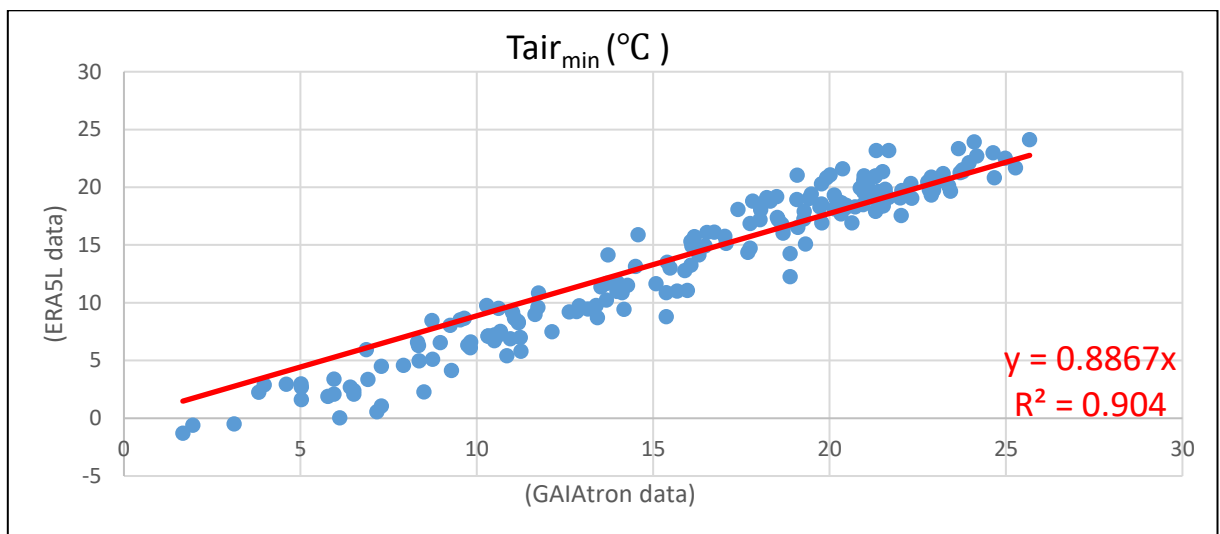
Εικόνα 62. Κομοτηνή 5.1 2020 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



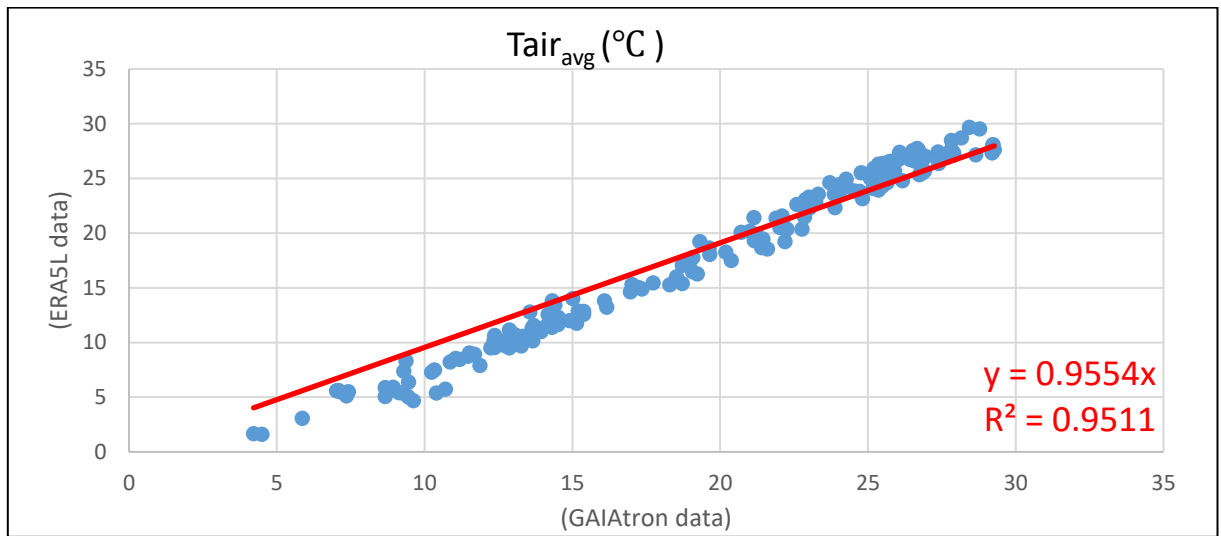
Εικόνα 631. Κομοτηνή 5.1 2020 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



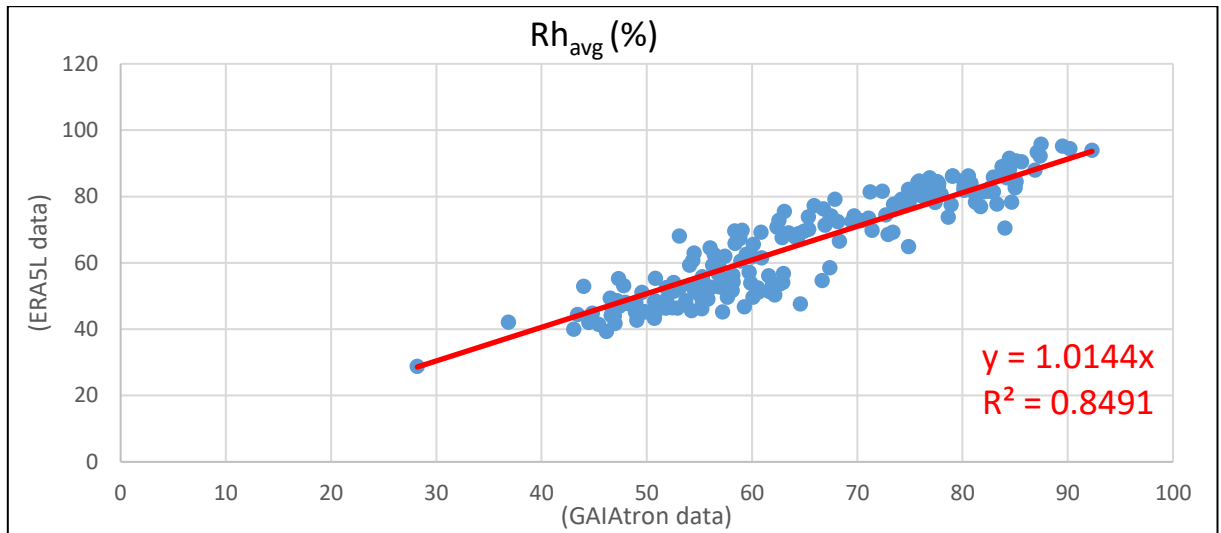
Εικόνα 64. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{min}$ ανά πηγή δεδομένων.



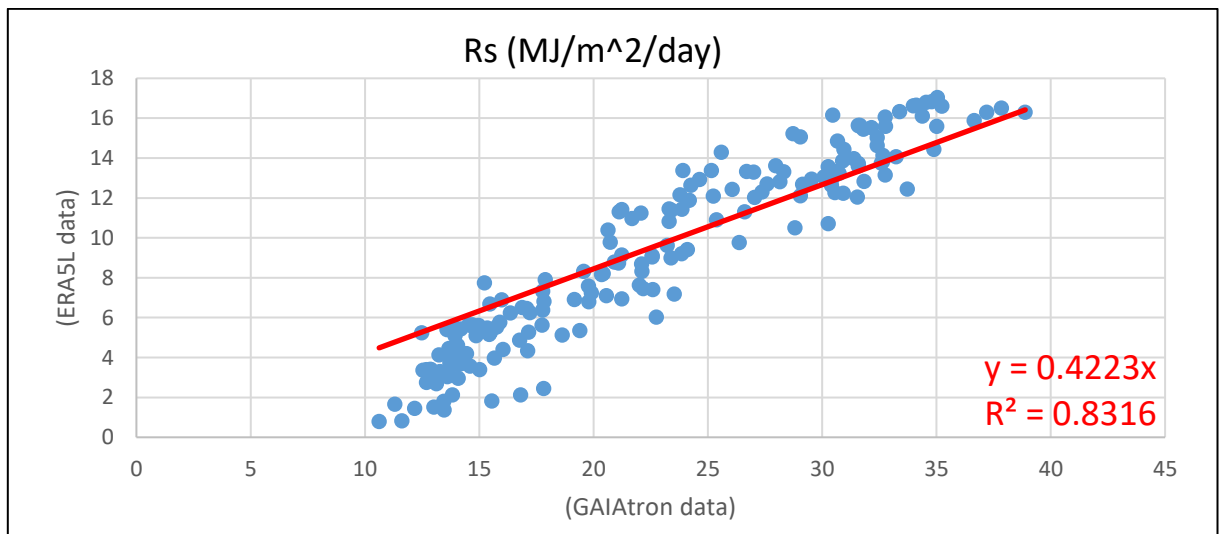
Εικόνα 653. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{min}$ ανά πηγή δεδομένων.



Εικόνα 664. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{avg}}$ ανά πηγή δεδομένων.

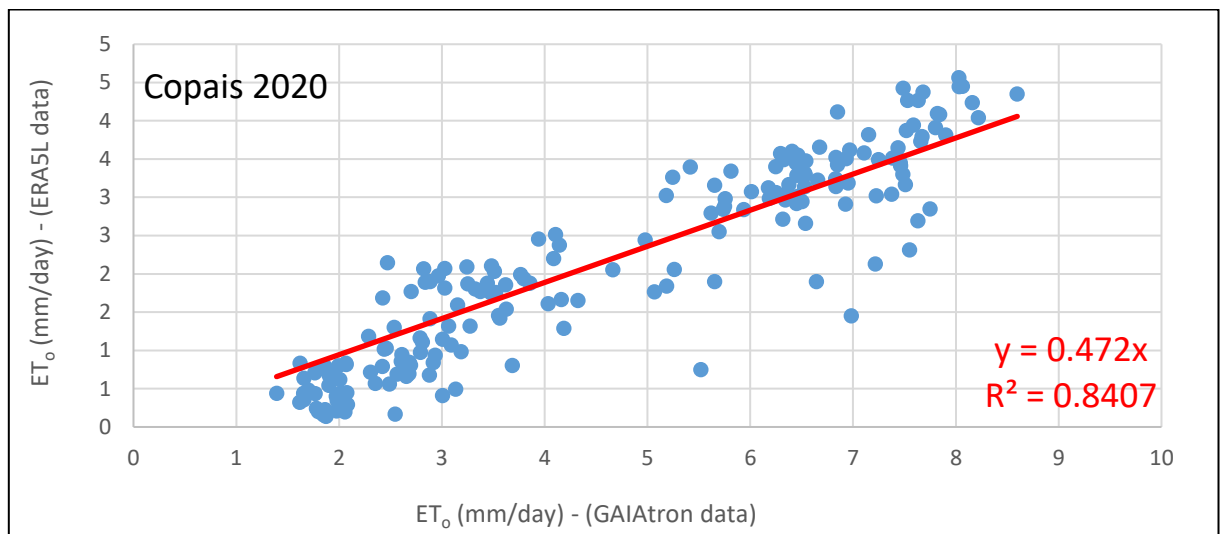


Εικόνα 67. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου RH_{avg} ανά πηγή δεδομένων.

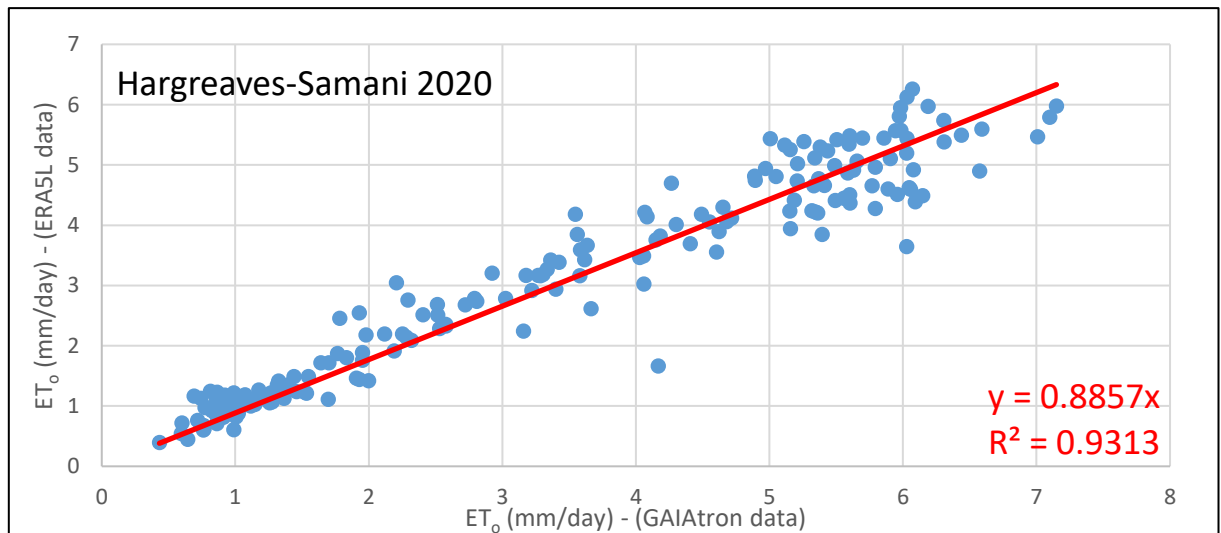


Εικόνα 68. Κομοτηνή 5.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Rs ανά πηγή δεδομένων.

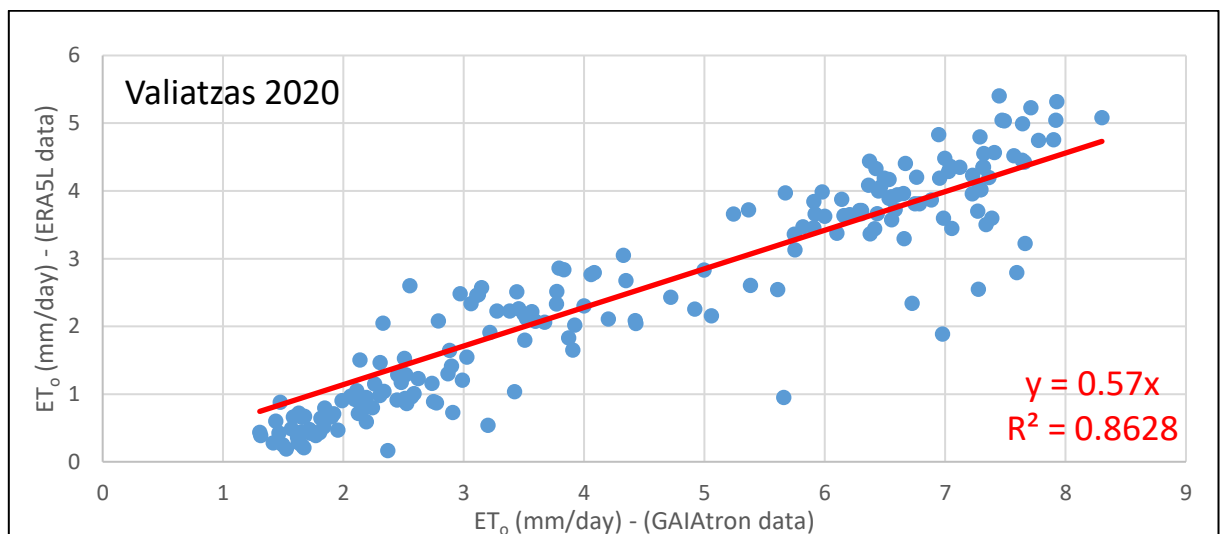
Κομοτηνή 6.1 2020



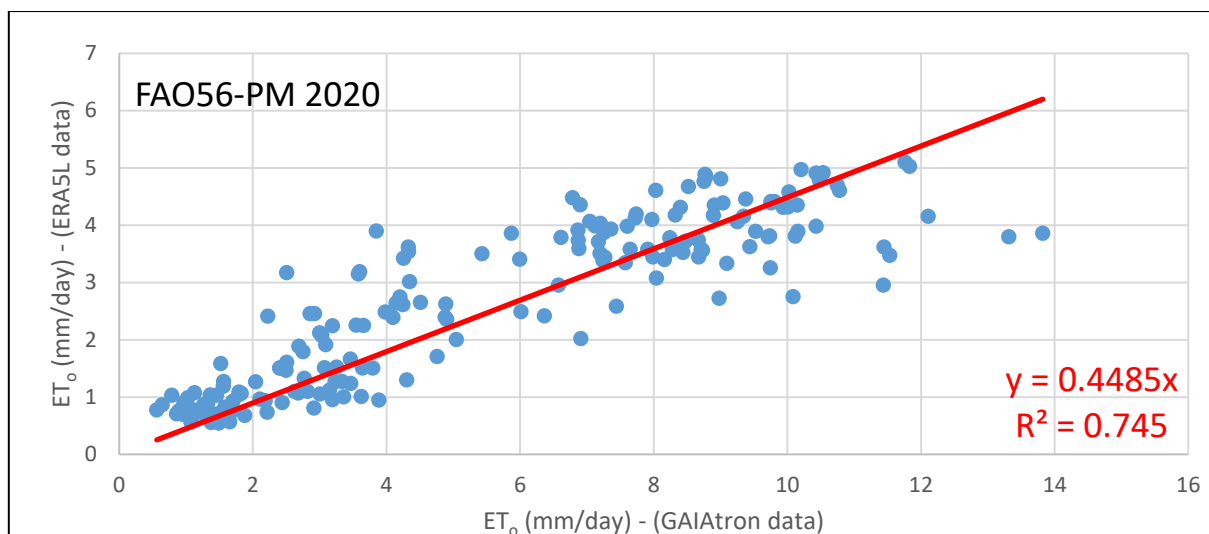
Εικόνα 69. Κομοτηνή 6.1 2020 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



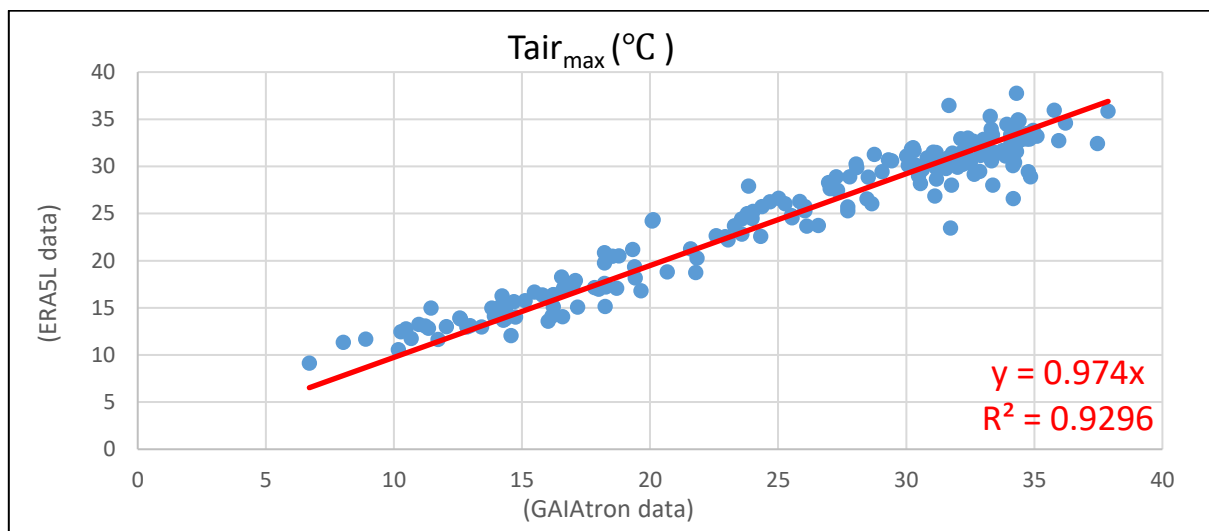
Εικόνα 708. Κομοτηνή 6.1 2020 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



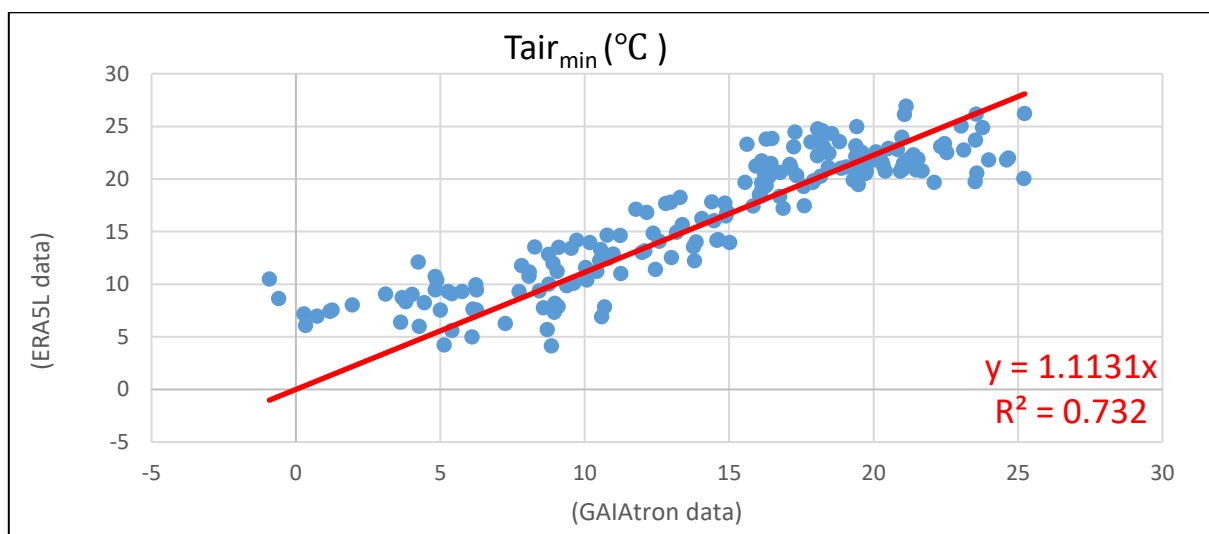
Εικόνα 71. Κομοτηνή 6.1 2020 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



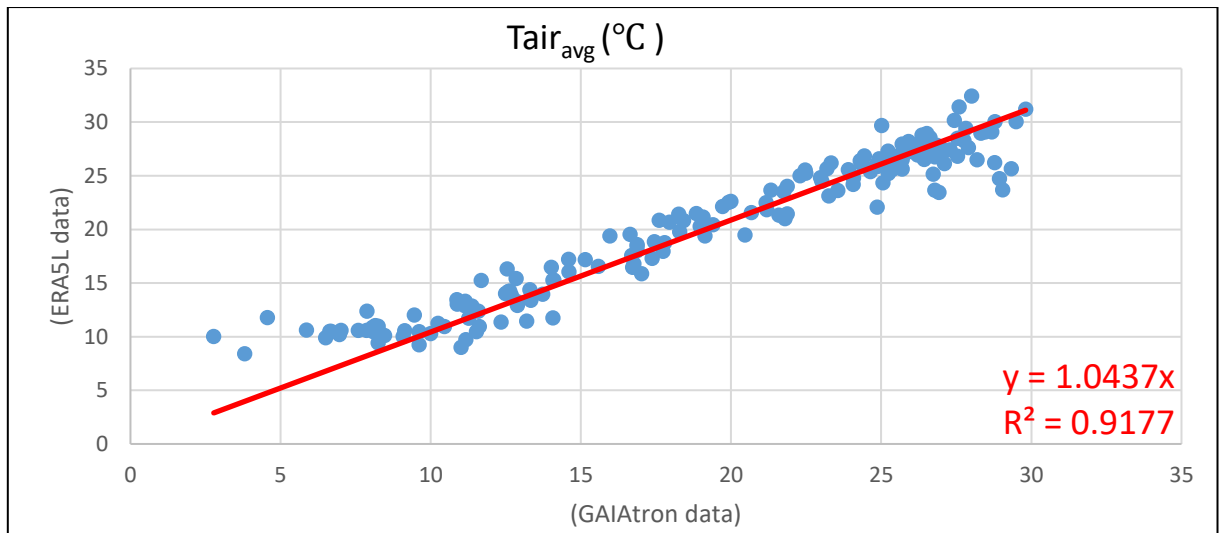
Εικόνα 72. Κομοτηνή 6.1 2020 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



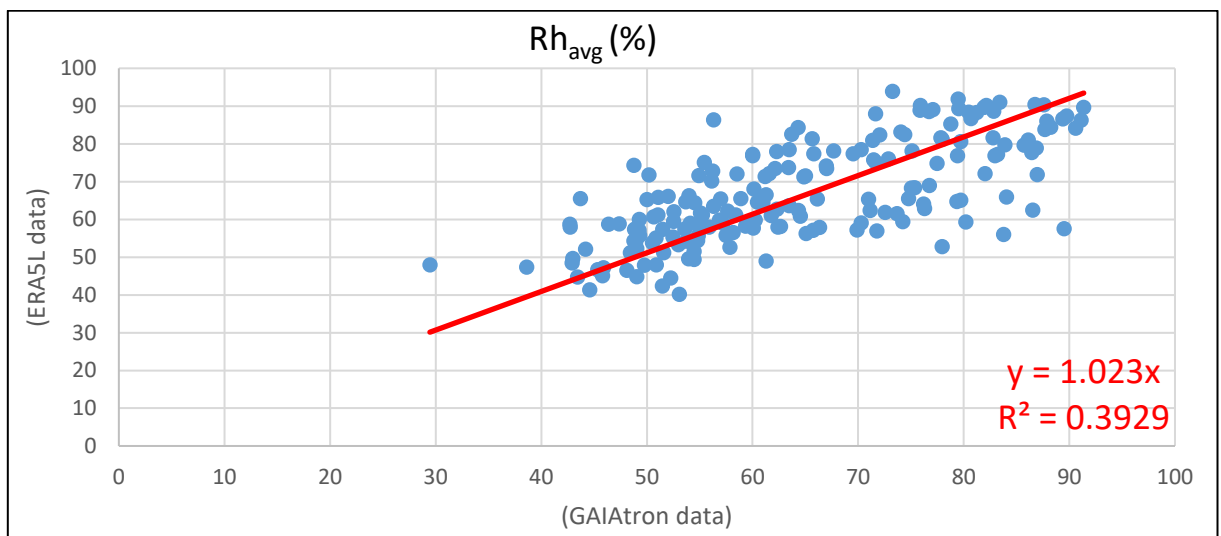
Εικόνα 731. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{min}$ ανά πηγή δεδομένων.



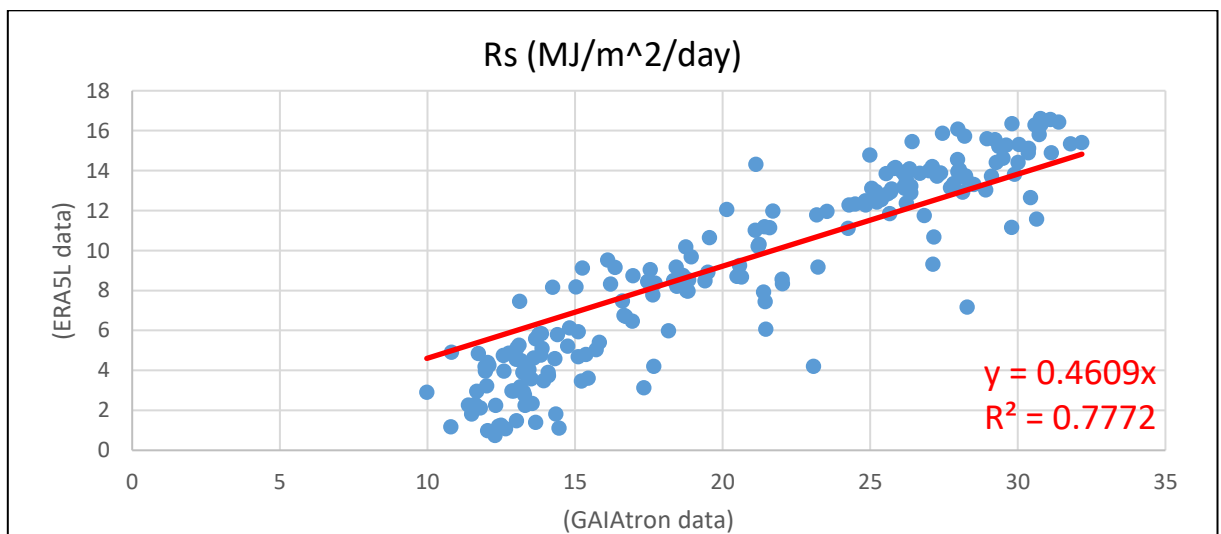
Εικόνα 74. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $Tair_{min}$ ανά πηγή δεδομένων.



Εικόνα 75. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου T_{air_avg} ανά πηγή δεδομένων.

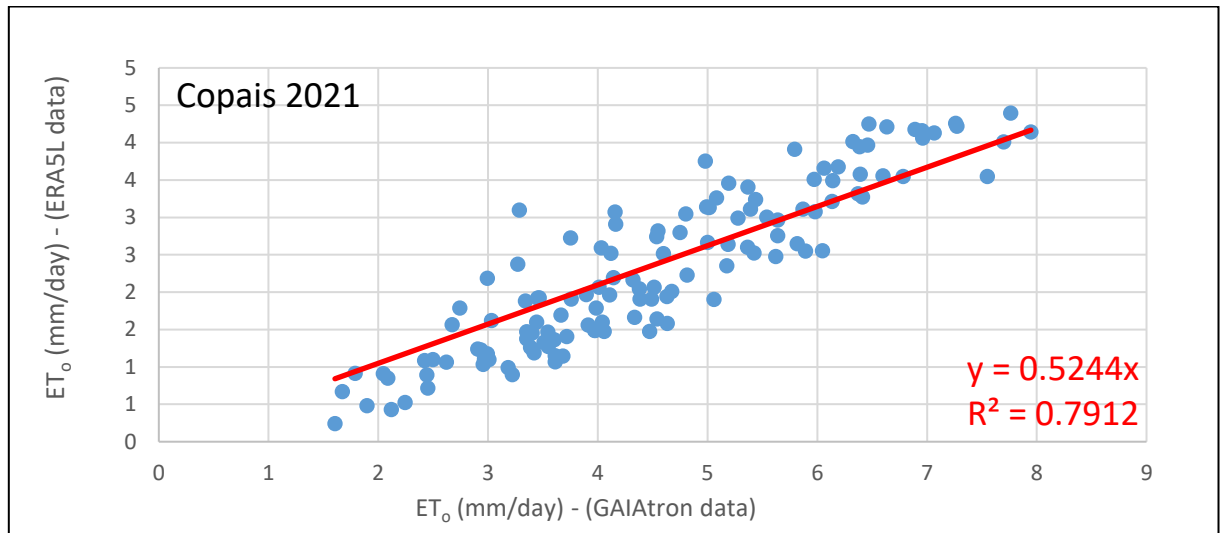


Εικόνα 76. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου RH_{avg} ανά πηγή δεδομένων.

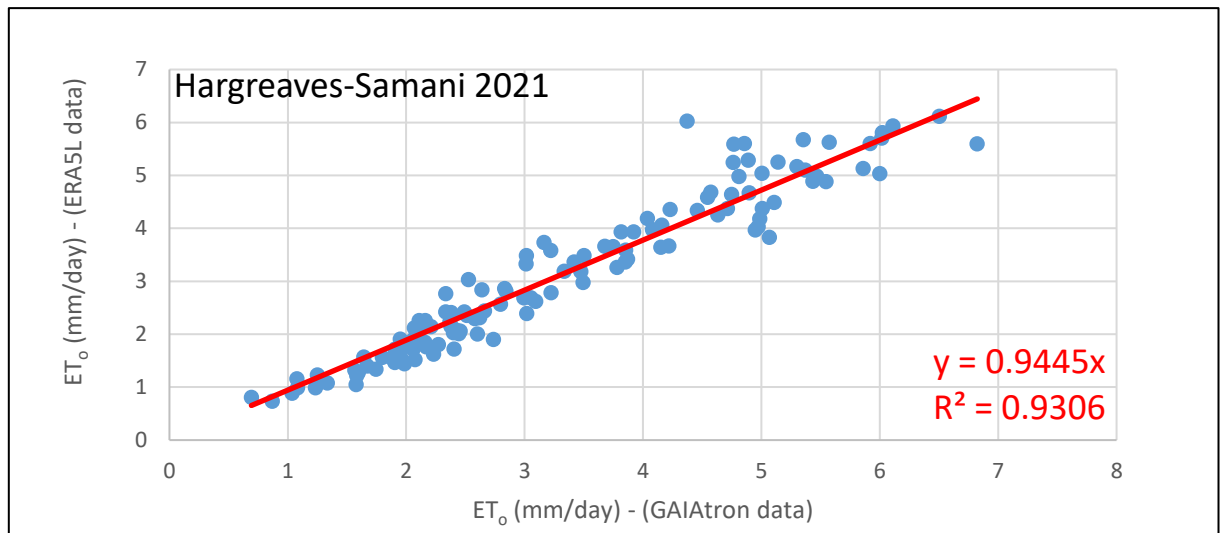


Εικόνα 77. Κομοτηνή 6.1 2020 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου R_s ανά πηγή δεδομένων.

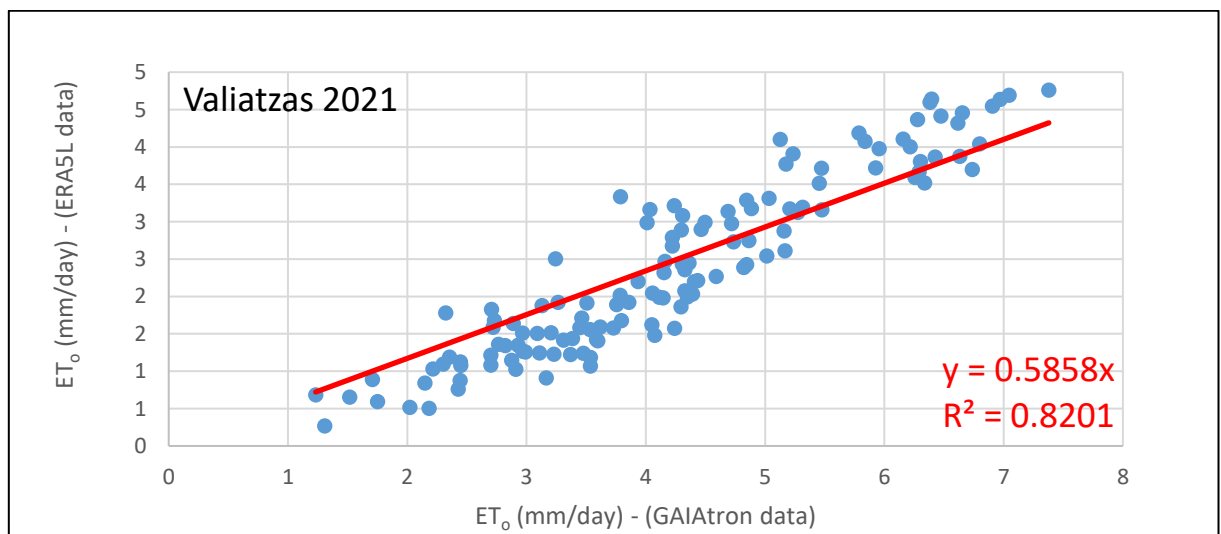
Μαραθώνας 2021



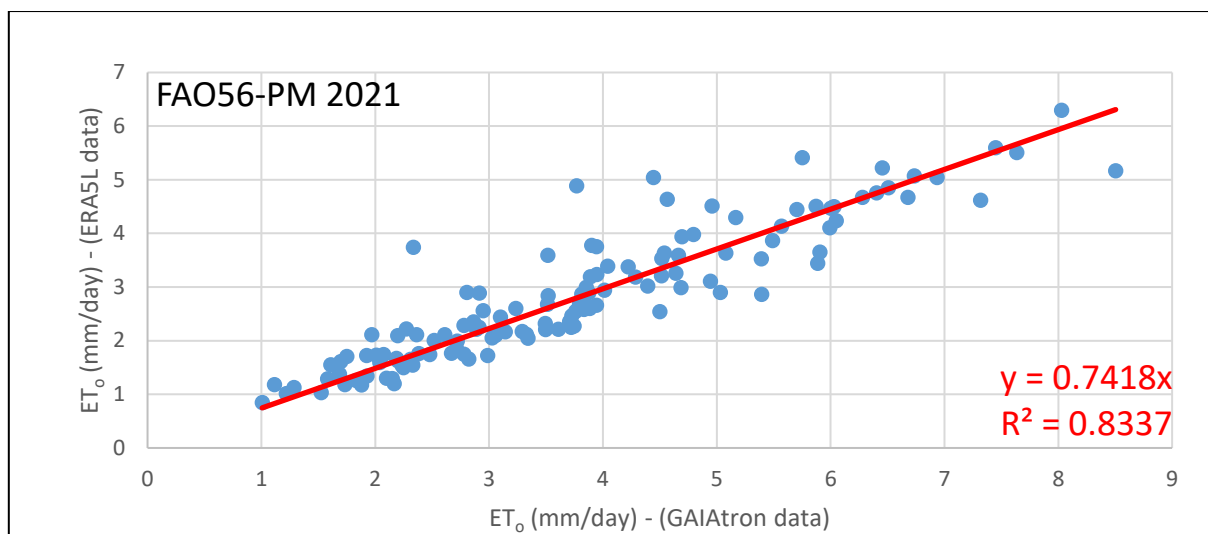
Εικόνα 78. Μαραθώνας 2021 – Copais – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



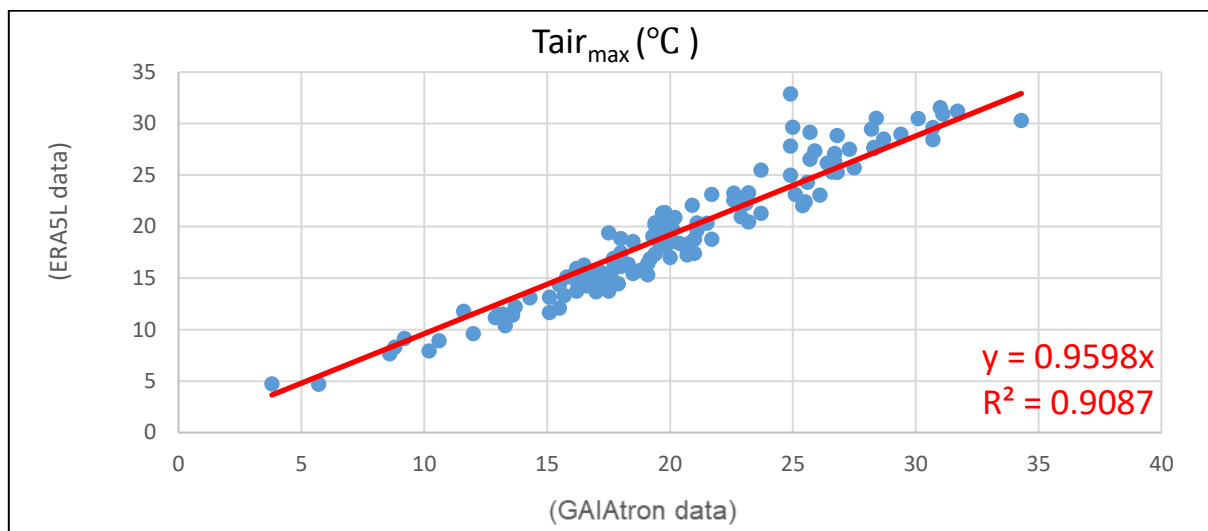
Εικόνα 79. Μαραθώνας 2021 – Hargreaves-Samani – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



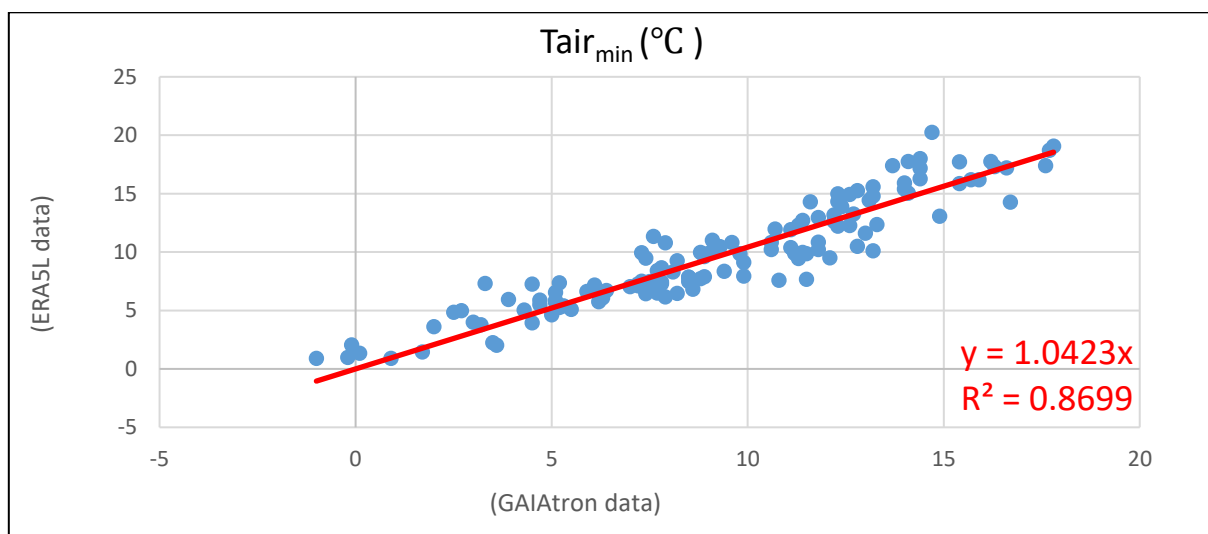
Εικόνα 808. Μαραθώνας 2021 – Valiatzas – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



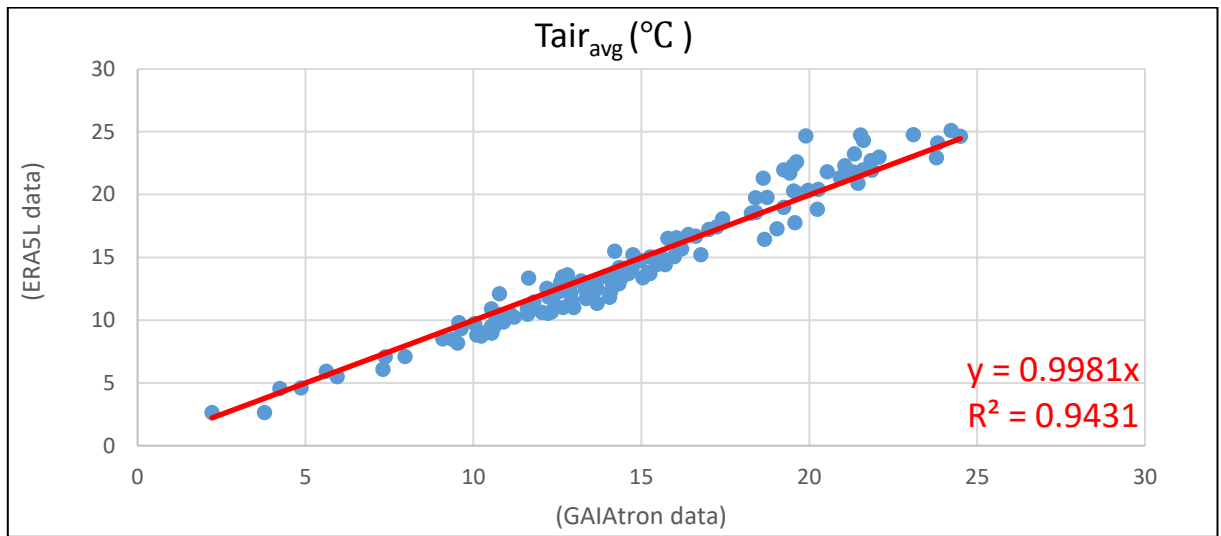
Εικόνα 81. Μαραθώνας 2021 – FAO56-PM – Σύγκριση ημερήσιας εξατμισοδιαπνοής ανά πηγή δεδομένων.



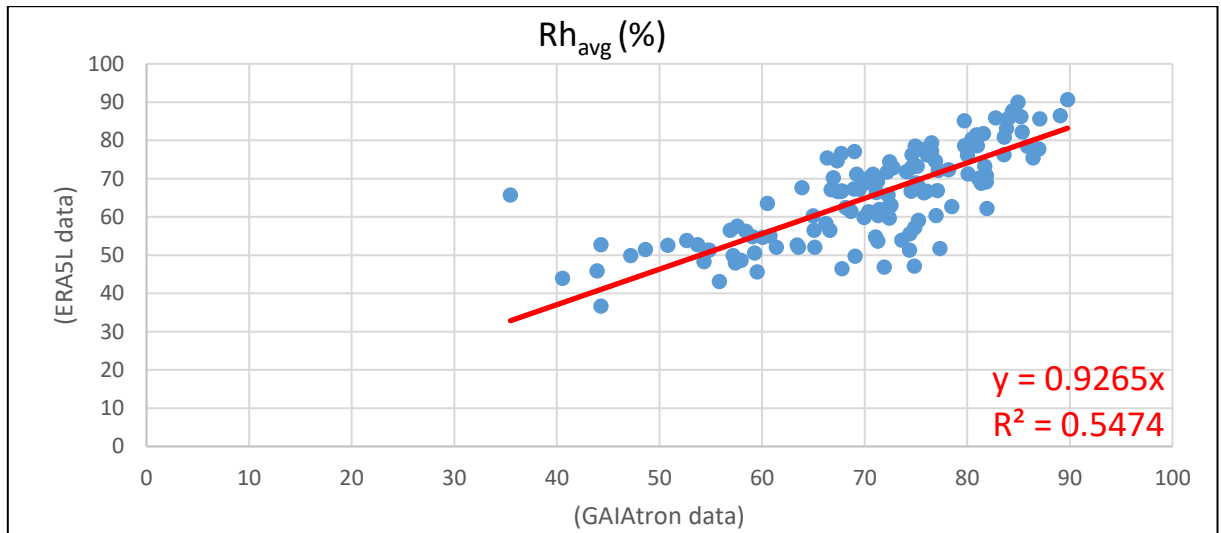
Εικόνα 82. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{max}}$ ανά πηγή δεδομένων



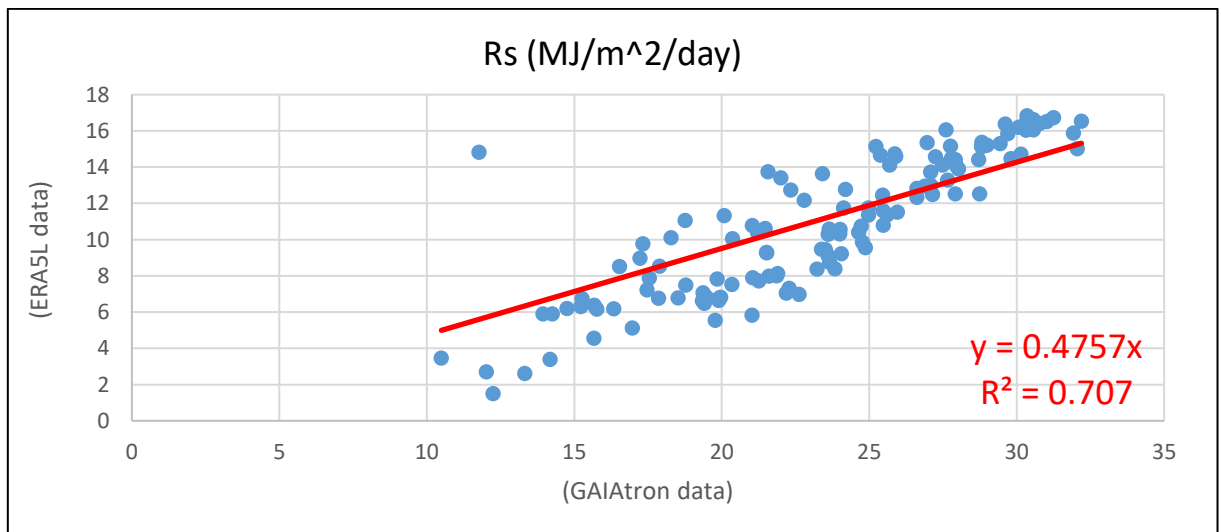
Εικόνα 83. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου $T_{air_{min}}$ ανά πηγή δεδομένων



Εικόνα 84. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου T_{air_avg} ανά πηγή δεδομένων



Εικόνα 85. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου Rh_{avg} ανά πηγή δεδομένων



Εικόνα 86. Μαραθώνας 2021 – Σύγκριση της μετεωρολογικής παραμέτρου R_s ανά πηγή δεδομένων.