



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ  
ΜΟΝΤΕΛΟΥ THOMAS ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ  
ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΕΥΡΩΤΑ**

*Παρασκευή Γ. Μαρίνου*

**Αθήνα, Οκτώβριος 2015**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Μπαλτάς**



# Ευχαριστίες

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ευάγγελο Μπαλτά, Καθηγητή ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεσή της. Επιπλέον, για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της, για την εξαιρετική συνεργασία μας, καθώς και για τις γενικότερες γνώσεις που μου μετέδωσε.

Παράλληλα, ευχαριστώ πολύ τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής: κ. Ν. Μαμάση, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, και κ. Β. Τσιχριντζή, Καθηγητή ΕΜΠ, για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ελισσάβητ Φελώνη, Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ, για τη συμπαράσταση και τη στήριξη που μου παρείχε, καθώς και για την πολύτιμη βοήθειά της και την ουσιαστική συμβολή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της Μεταπτυχιακής Εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη κ. Ο. Τζωράκη – Επίκ. Καθηγήτρια στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου για τα δεδομένα και όλο το πληροφοριακό υλικό που μου παρείχε, τα οποία αποτέλεσαν αναπόσπαστο κομμάτι της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ όλους μου τους φίλους που στάθηκαν δίπλα μου σε όλες τις δυσκολίες, για όλες τις υπέροχες στιγμές που μου χάρισαν και ακόμα μου χαρίζουν, δίνοντάς μου δύναμη να συνεχίζω και να πραγματοποιώ κάθε μου όνειρο.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, στη γιαγιά μου, στους γονείς μου και στις αδελφές μου, για την κατανόηση, την αγάπη και την ηθική στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Παρασκευή Μαρίνου

# Πίνακας περιεχομένων

<b>Ευχαριστίες</b> .....	<b>i</b>
<b>Περίληψη</b> .....	<b>iv</b>
<b>Extended abstract</b> .....	<b>v</b>
Introduction.....	v
Study area and Data.....	v
Methodology .....	ix
Results .....	xii
Summary and Conclusions .....	xv
<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο της εργασίας .....	1
1.2 Διάρθρωση της εργασίας .....	2
<b>2. Περιγραφή Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Ευρώτα</b> .....	<b>4</b>
2.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή.....	4
2.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά .....	6
2.3 Γεωλογία.....	7
2.4 Χρήσεις γης.....	10
2.5 Κλίμα.....	13
<b>3. Ανάλυση - Επεξεργασία Δεδομένων</b> .....	<b>16</b>
3.1 Το δίκτυο μετρήσεων .....	16
3.2 Συνοπτική παρουσίαση μεθοδολογίας .....	19
3.3 Κατακρημνίσματα.....	20
3.3.1 Περιγραφή Δεδομένων.....	20
3.3.2 Επεξεργασία Δεδομένων .....	21
3.4 Εξατμισοδιαπνοή .....	32
3.4.1 Η μέθοδος Penmann-Monteith .....	32
3.4.2 Εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής .....	33
3.5 Υδρολογικά δεδομένα .....	37

3.5.1 Περιγραφή πρωτογενών δεδομένων .....	37
3.5.2 Επιλογή και επεξεργασία δεδομένων .....	38
<b>4. Ανάπτυξη – Εφαρμογή Μοντέλου Υδατικού Ισοζυγίου .....</b>	<b>41</b>
4.1 Το Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου παραμέτρων a, b, c, d .....	42
4.2 Εφαρμογή μοντέλου στην περιοχή μελέτης.....	44
4.3 Βαθμονόμηση .....	47
<b>5 Αποτελέσματα .....</b>	<b>51</b>
5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων.....	51
5.2 Ανάλυση Ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου .....	54
<b>6 Σύνοψη - Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα.....</b>	<b>61</b>
<b>Αναφορές.....</b>	<b>66</b>

## Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζεται η περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα, στην οποία και εφαρμόζεται ένα ημικατενεμημένο, εννοιολογικό, προσδιοριστικό υδρολογικό μοντέλο. Συγκεκριμένα, έγινε ανάλυση και επεξεργασία σε τρεις υπολεκάνες απορροής του ποταμού Ευρώτα: Οινούντας (Κλαδάς), Ρασίνα (Κουμουστά), Ρασίνα (Αεροδρόμιο), για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν τα διαθέσιμα δεδομένα ημερήσιων παροχών για το υδρολογικό έτος 2009-2010, καθώς και στην υπολεκάνη του Βιβαρίου σε μηνιαία βάση για την περίοδο 2005-2009.

Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου στα επιμέρους τμήματα της λεκάνης απορροής του Ευρώτα εφαρμόστηκε το μοντέλο Thomas “abcd”, κατά το οποίο τα δεδομένα των χρονοσειρών της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιούνται σαν είσοδος και της απορροής ως έξοδος. Στην περιοχή χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των 5 συνολικά βροχομετρικών σταθμών, από τα οποία δημιουργήθηκαν τα πολύγωνα του Thiessen στο περιβάλλον ArcGIS 10, με στόχο τη χρήση της αντίστοιχης μεθόδου για τον υπολογισμό του μέσου ύψους βροχής ανά υπολεκάνη. Για τις ανάγκες του μοντέλου, η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής έγινε με χρήση της μεθόδου Penman – Monteith.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του μοντέλου με παραμέτρους βελτιστοποίησης τις τιμές των  $a, b, c, d, S(0)$  και  $G(0)$ . Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου κριτήριο αποτέλεσε η αποτελεσματικότητα μεταξύ υπολογισμένης και μετρημένης χρονοσειράς απορροής, η οποία αξιολογήθηκε μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης Nash-Sutcliffe (*Nash. & Sutcliffe, 1970*).

Τέλος, ο προσδιορισμός της μεταβολής των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε πιθανή μεταβολή κάποιας εκ των παραμέτρων αυτού ( $a, b, c$  και  $d$ ), καθώς και του βαθμού με τον οποίο κάθε μεταβλητή τα επηρεάζει, καθορίστηκε με την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου. Σαν ενδεικτική της συμπεριφοράς του μοντέλου παράμετρος, θεωρείται η μεταβολή της μέσης τιμή των προσομοιωμένων απορροών.

## Extended abstract

### Introduction

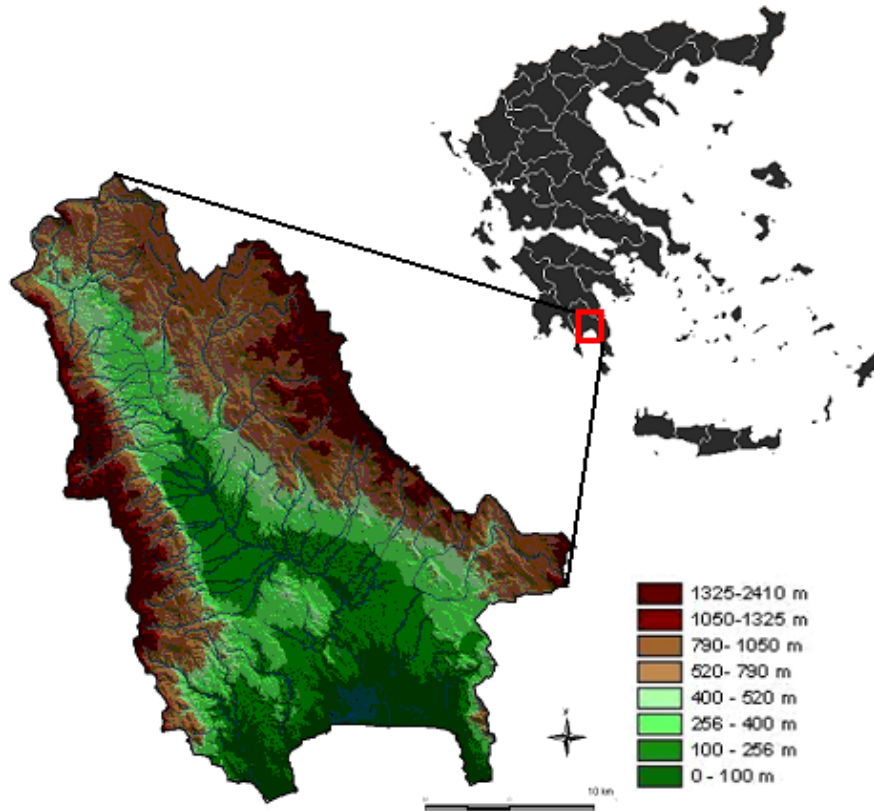
The objective of this postgraduate thesis is to apply a methodology to estimate the hydrologic water balance of Evrotas River Basin and to determine the gravity of the main hydrological parameters through sensitivity analysis. The model was implemented using daily time series into segments (sub-catchments) with common hydrological and geomorphological characteristics. In particular, the following three sub-basins of Evrotas river; Oinountas (Kladas), Rasina (Koumousta) and Rasina (Airport) were selected for analysis on a daily basis, while the sub-basin of Vivari studied in a monthly time step in order to achieve comparability of results.

Watershed models are powerful tools for simulating the effect of watershed processes and management on soil and water resources. However, no comprehensive guidance is available to facilitate model evaluation in terms of the accuracy of simulated data compared to measured flow and constituent values.

The “abcd” model, which is a simple hydrologic model for simulating streamflow in response to precipitation and potential evapotranspiration developed by Thomas (1981), was used in order to estimate the water balance of the selected sub-catchments

### Study area and Data

Our study catchment, the Evrotas, like many rivers in the Mediterranean region, is a temporary river with intermittent flow in the main stream and many tributaries. The basin (Figure 1) is located in the south-eastern Peloponnese (Greece) covering an area of 1.739 km<sup>2</sup>, with a main stream length of 90 km.



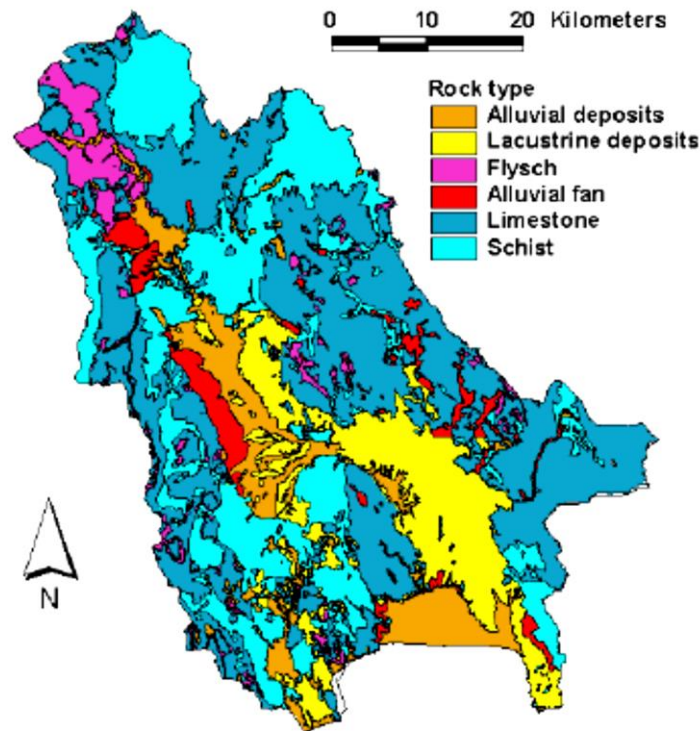
**Figure 1:** Location of the Evrotas river basin (Vernooij et al., 2011)

The basin has a Mediterranean climate with mild or cold winters and prolonged hot and dry summers with a mean annual temperature of 18.48°C at Sparta. Monthly mean temperatures are typically 10.28°C in winter and 27.58°C in summer at this location. The catchment is bounded by the Taygetos (2407 m above MSL) and Parnonas (1940 m above MSL) mountains from which numerous ephemeral and intermittent streams discharge into the river network. The main tributaries are the Oinountas, Magoulitsa, Gerakaris, Kakaris, and Rasina (intermittent flow), Mariorema, Xerias (episodic flow). Some 40% of the catchment area is above 600 m elevation, 45% between 150 and 600 m, and 13% between sea level and 150 m. The land surface is approximately 59% forest, 40% agricultural and 1% urban. The population is 66.000, the largest town being Sparta with 18.000 inhabitants. The land cover classes derived from Corine are scrub and/or herbaceous vegetation associations (60.8%), forests (16.0%), heterogeneous agricultural areas (15.0%), permanent crops (6.5%), open spaces with little or no vegetation (1.1%), urban fabric (0.3%), arable land (0.1%) and the rest (0.2%) are industrial, commercial and transport units, mine, dump and construction sites and artificial, non-agricultural



vegetated areas. The subsurface of the area consists of limestone (49%) and schist (29%) (Vernooij et al, 2011).

The valley is filled with fluvial sediments of different age. In Figure 2 the rock types at the surface of the river basin are shown. The alluvial deposits are present in the valley, where the main river flows.



**Figure 2:** Rock types at the surface of the river basin (Cazemier et al., 2011)

The Taygetos and Parionas mountains are largely karstic, but with areas of impermeable formations. A series of low-transmissivity alluvial fans, restricted to the piedmont zone adjacent to the east edge of the Taygetos mountains, comprise significant water storage. The Taygetos karst has high transmissivity ( $10^{-3}$ – $10^{-4}$   $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) and recharges the alluvial fans and associated aquifer north-west of Sparta. The unsaturated zone in this region has thickness 20–30 m with saturated hydraulic conductivity varying between  $7 \times 10^{-7}$  –  $8 \times 10^{-5}$   $\text{ms}^{-1}$  (Antonakos and Lambrakis 2000). The Sparta aquifer is penetrated by numerous wells used to provide water for irrigation. Long sections of the river have intermittent flow, influenced by the local geology, low rainfall, abstraction and high evaporation. The percentages of the total river network having permanent and intermittent flow, respectively, are 3.5% and

4.3% (total river network 5.143 km). The highest part of the stream network (92% of river total length) has rain-generated flow which is episodic and appears only during a rain event. The main causes of river bed desiccation are the steep topography of the terrain, the karst geology and groundwater abstraction for irrigation.

The experimental sampling design of the hydrology of the watershed focuses on the collection of a variety of data to constrain processes at various scales, given the existing budgetary limitations and the large area of the watershed. The Evrotas river hydrology simulation requires time series of meteorological data (rainfall, minimum and maximum temperature, dew point temperature, solar radiation, wind speed and sunshine percentage) at the daily time step and observed streamflow data of the river to upstream positions.

In this study, data used for processing generated from the meteorological and hydrological gauging stations which are installed at appropriate places in this basin (Figure 4). Geographic Information System (GIS) thematic maps of the hydrological network, geology, soils, and slopes were created or provided by the Regional Unit of Lakonia.



**Figure 3:** Meteorological (red triangles) and Flow (blue circles) gauging stations in Evrotas river basin

There are six flow-gauging stations on the Evrotas and its tributaries, as shown in Figure 3. Two of these, at Vrontamas and Vivari, are on the main river; two are on the Oinountas and two on the Rasina tributaries. Vrontamas station is the oldest providing available flow data since 1973 on a monthly basis, while the station Kladas and both hydrometric stations of Rasina provide daily runoff measurement data since 2008 and 2009 respectively.

Daily precipitation has been measured since the 1970s at six stations: Ellos (4 m elevation), Riviotissa (163.5 m), Vrontamas (280 m), Perivolia (490 m), Sellasia (590 m) and Vasaras (646 m) (Figure 3). The mean annual precipitation measured at these sites ranges between 1341 mm (Perivolia) and 565 mm (Vrontamas) for the hydrologic years 1969-2011.

Two temperature stations located within the basin were used to drive the hydrologic model using daily data. These stations are Riviotissa and Sellasia which have been in operation since 1966. Temperature time series in daily time step of Sellasia station were used for the two sub-basins of Oinountas (Kladas) and Vivari, while the temperature data of Riviotissa were used for the other two stations of Rasina.

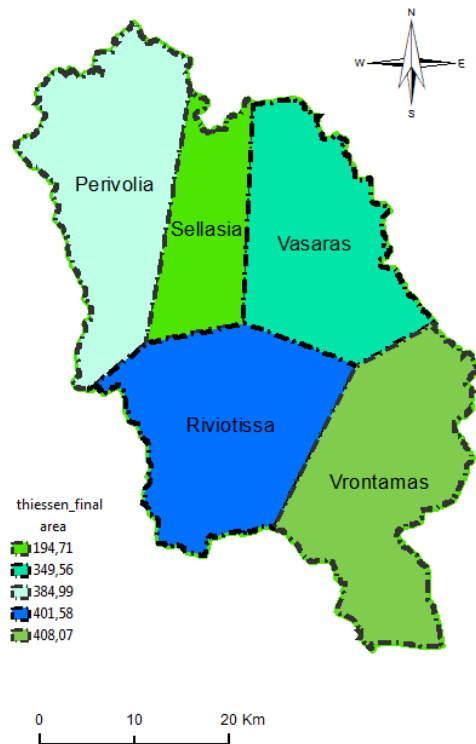
The data of wind speed and relative humidity received by the meteorological station of Sparta for the period 01/01/1974 to 31/12/2004, from the Hellenic National Meteorological Service. As the station of Sparta did not provide sunshine data, for model processing purposes the only available time series of relative sunshine  $n$  (hr), for the period 1977-2002, of the meteorological station of Kalamata (HNMS) were used, which is located outside the basin.

## **Methodology**

For modelling purposes, the main physiographic characteristics were estimated for each gauged sub-basin, including drainage area, mean elevation and also spatially discretization of the study catchment, using the ArcGIS 10 interface.

The Thiessen method was applied, as revealed by the GIS interface, for estimating average annual precipitation over the whole catchment for the years 1969-2011, considering the fact that precipitation varies considerably over not only large but, also over quite limited areas. Thiessen is a graphical technique which calculates station weights based on the relative areas of each measurement station in the Thiessen polygon network. The individual weights are multiplied by the station observation and the values are summed to obtain the areal average precipitation.

The rainfall is never uniform over the entire area of the basin or catchment, but varies in intensity and duration from place to place. Thus the rainfall recorded by each rain gauge station weighted according to the area it represents (Figure 4).



**Figure 4:** Thiessen polygons of the 5 rainfall stations in Evrotas river basin

Evapotranspiration occurs as a process that depends on solar radiation, air temperature, relative humidity (i.e., vapor pressure deficit) and wind speed. A large number of empirical methods have been developed over the last 50 years to estimate evapotranspiration from different climatic variables. In this study, ET was estimated, at both daily and monthly basis, using the Penman-Monteith equation.

In this paper, we study the application of the water balance model both on a daily and a monthly basis. The available hydrological data in daily time step refer to the period between 07/2009 - 12/2010 for Oinountas (Kladas) Rasina (Koumousta), Rasina (Airport). Therefore the flow time series used in the model in these areas refer to the hydrologic year 2009-2010. The sub-basin of Vivari was also studied in monthly time step for the period 2006-2009. The four sub-catchments are presented in the Figures 6-9.

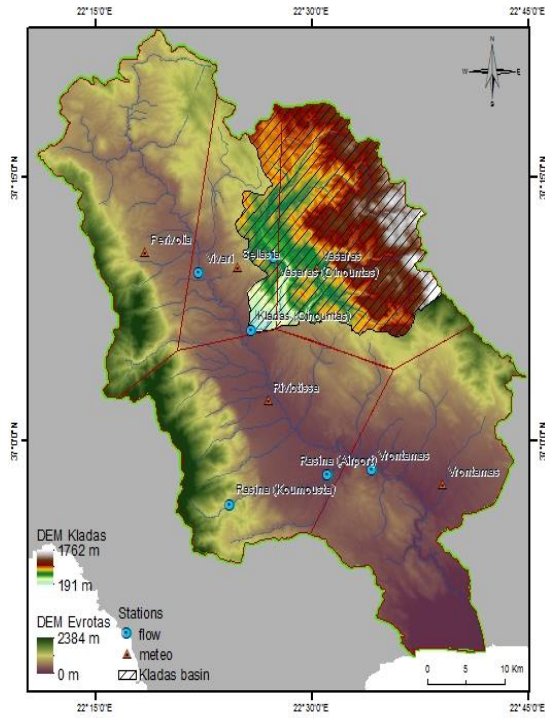


Figure 6: Oinountas (Kladas) sub-basin

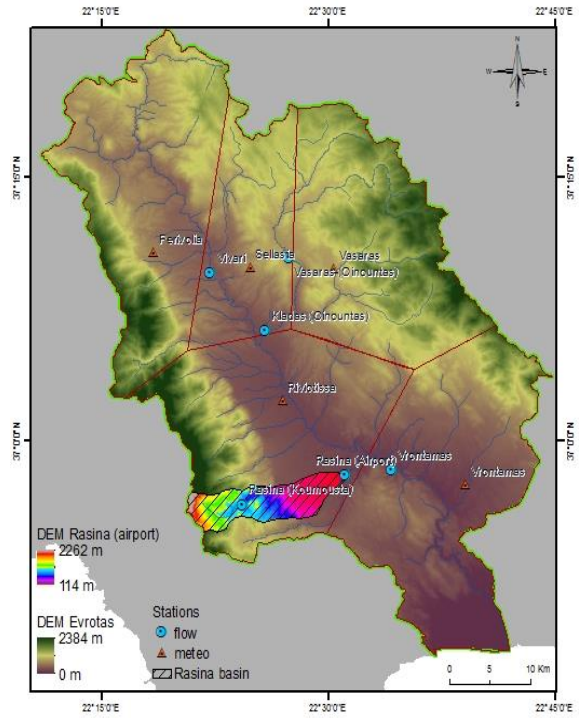


Figure 7: Rasina (Airport) sub-basin

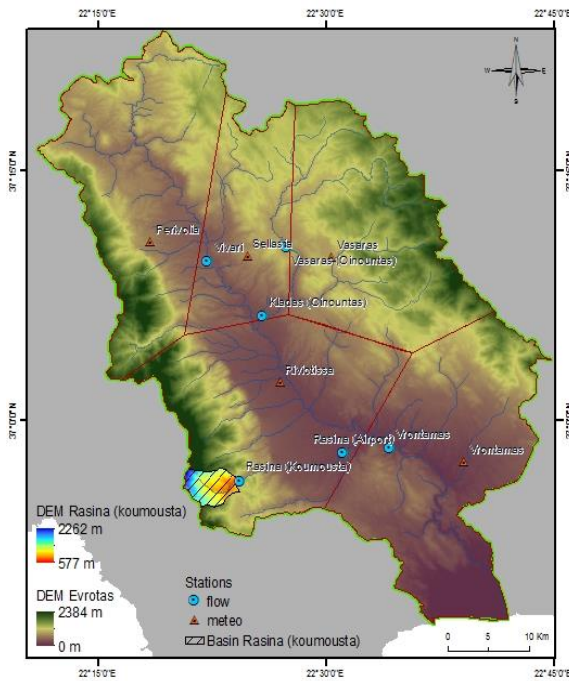


Figure 8: Rasina (Koumousta) sub-basin

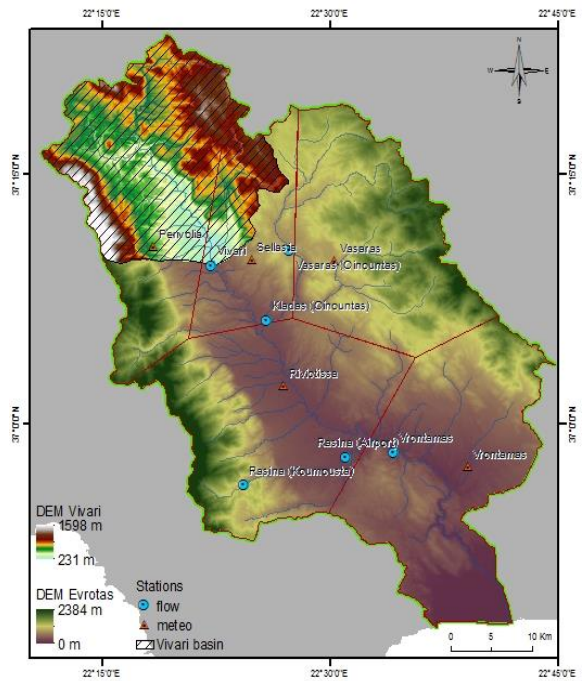
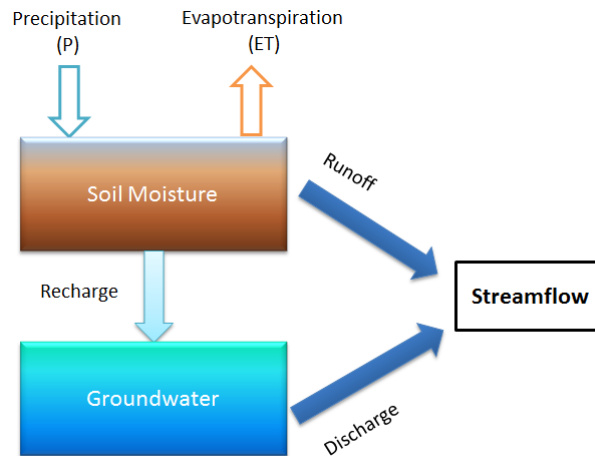


Figure 9: Vivari sub-basin

As mentioned, in order to estimate the water balance of the selected sub-catchments., “abcd” Thomas model was used. The model is comprised of two

storage compartments: soil moisture and groundwater. The soil moisture gains water from precipitation and loses water to evapotranspiration (ET), surface runoff and groundwater recharge. The groundwater compartment gains water from recharge and loses water as discharge. The total streamflow is the sum of surface runoff from the soil moisture and groundwater discharge (Figure 10).



**Figure 10:** Streamflow simulation by Thomas “abcd” model

There are four parameters governing the model behavior:

- **a:** controls the amount of runoff and recharge that occurs when the soils are under-saturated.
- **b:** controls the saturation level of the soils.
- **c:** defines the ratio of groundwater recharge to surface runoff.
- **d:** controls the rate of groundwater discharge.

Sensitivity analysis is the study of how the uncertainty in the output of a mathematical model or system (numerical or otherwise) can be apportioned to different sources of uncertainty in its inputs. (Saltelli, A. et al, 2008). In this thesis the hydrological parameters have been altered in equal intervals for each sub-basin specifically and separately.

## Results

Calibration is the process of the modeling, in which the user tunes the parameters of the simulation model, in such a way that the new output simulation data fit better with the observed ones. The comparison between observed and simulated runoff yielded Nash–Sutcliffe efficiency values of 0.87 for Oinountas Kladas, 0.72 for Rasina

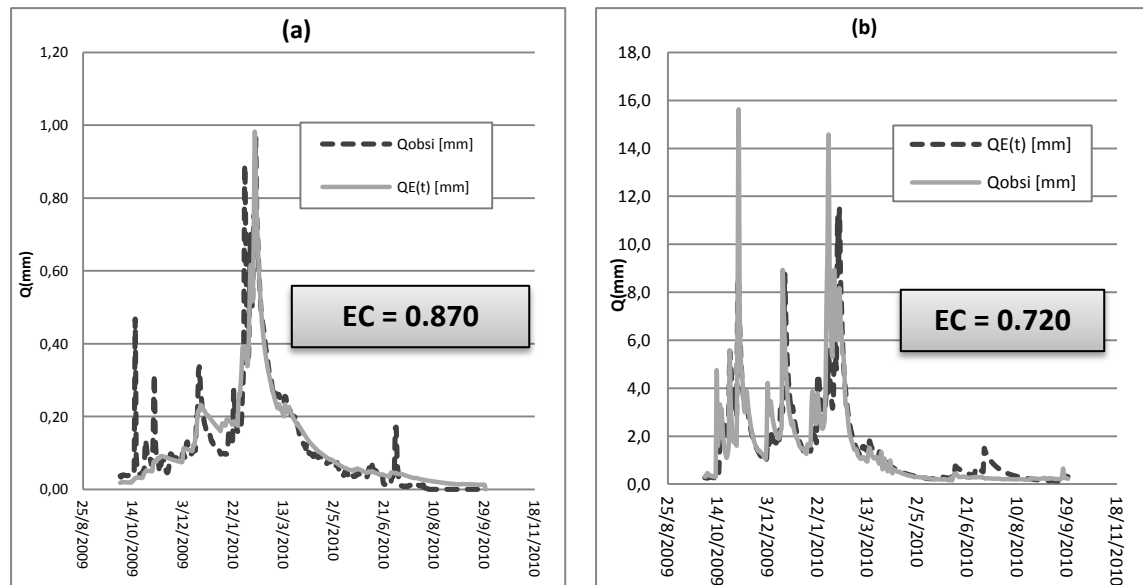


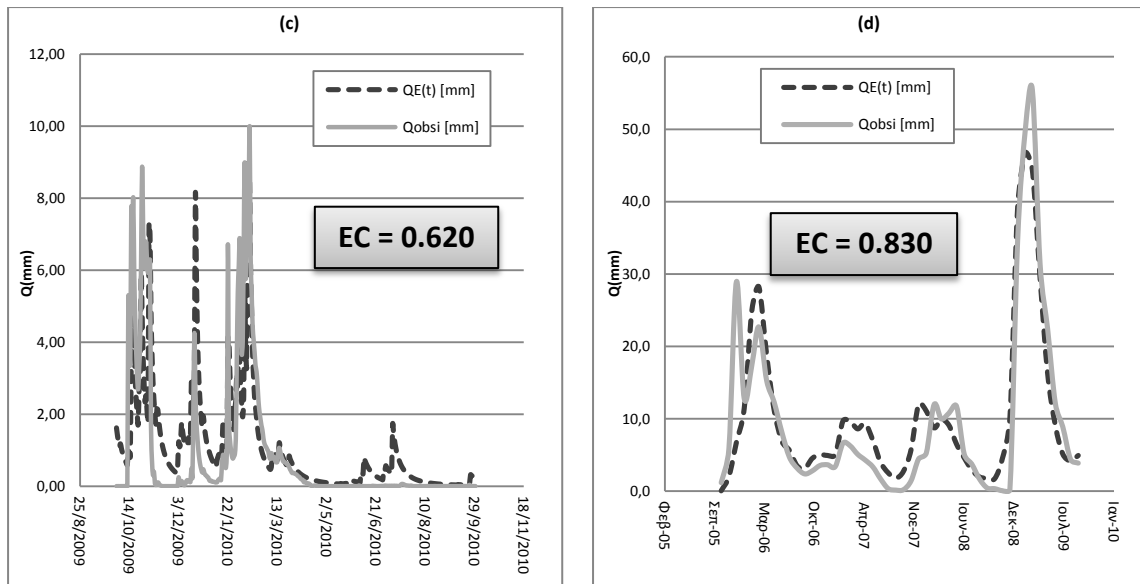
Koumousta, 0.62 for Rasina Airport and 0.83 for Vivari, providing a reliable fit model for every sub-catchment (EC ,Table 1).

**Table 1:** Values of basic parameters for each sub-catchment after calibration of the model

Parameter	<i>Oinountas Kladas</i>	<i>Rasina Koumousta</i>	<i>Rasina Airport</i>	<i>Vivari</i>
<b>a</b>	0,9995	0,9631	0,8852	0,9906
<b>b</b>	733,44	1100,00	503,91	1500,00
<b>c</b>	0,8567	0,8511	0,8378	0,7677
<b>d</b>	0	0	0	0
<b>S<sub>0</sub></b>	311,88	210,03	180,34	100,00
<b>G<sub>0</sub></b>	80,00	80,00	80,00	74,00
<b>EC</b>	<b>0,87</b>	<b>0,72</b>	<b>0,62</b>	<b>0,83</b>

Figure 11 presents the comparison of simulated discharges versus observed data for (a) Kladas, (b) Rasina (Koumousta), (c) Rasina (Airport) gauging stations, in a daily basis analysis and (d) Vivari gauging stations in a monthly basis, respectively, for the calibration period. The fit between the model discharge predictions and the observed discharge showed good agreement as indicated the evaluation of the EC indices.





**Figure 11:** Simulated and observed discharge for (a) Kladas, (b) Rasina (Koumousta), (c) Rasina (Airport) and (d) Vivari gauging stations

Sensitivity analysis is the study of how the uncertainty in the output of a mathematical model or system (numerical or otherwise) can be apportioned to different sources of uncertainty in its inputs. (Saltelli, A. et al, 2008). In this thesis the hydrological parameters have been altered in equal intervals for each sub-basin specifically and separately. The simulation output that has been controlled over the sensitivity analysis is the change of the average discharges, by changing each parameter. The results of sensitivity analysis indicated the following conclusions:

- ✓ The amount of runoff and recharge that occurs when the soils are under-saturated (parameter a) and the saturation level of the soils are the most crucial parameters for Kladas basin, while changing the basin groundwater (parameter c) does not significantly affect the hydrological characteristics of the basin.
- ✓ For both basins in Rasina (Koumousta, Airport), the analysis indicated that the most important parameter affecting the model is the fraction of streamflow resulting from the draining of groundwater, while change in the actual evapotranspiration and storage of soil moisture does not entail significant change.
- ✓ The model for the Vivari basin seems to be more "sensitive" for an up to 30% increase or decrease of the value of the parameter a, i.e. the tendency to



occur runoff without the ground become saturated, while further reducing most critical shown parameter  $c$ , which reflects the size of the contribution of groundwater recharge to surface runoff. Less seems to affect at that location the actual evapotranspiration and storage of soil moisture (variable  $b$ ), while a change of the value of  $S(0)$  does not affect almost any model.

### **Summary and Conclusions**

Model simulation of hydrology, using “abcd” model, for the four sub-basins of Evrotas River was in good agreement with field observations. The developed methodology constrained the parameters of the hydrologic simulation of the sub-catchments providing consistent results and suggesting its usefulness as a tool for temporary rivers management.

Further development of this thesis, could be an update in the structure of the model, including more components of the hydrologic cycle such as land use, sediment transport, slope classes, infiltration interception etc., that didn't simulated in this one. Additional flow data in a daily step would give a more reliable simulation model, as in the current research the model applied to just one hydrological year.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εφαρμογή ενός ημικατενεμημένου, εννοιολογικού, προσδιοριστικού υδρολογικού μοντέλου στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα και η διερεύνηση της βαρύτητας των βασικότερων υδρολογικών παραμέτρων μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας. Η εφαρμογή του μοντέλου έγινε με χρήση ημερήσιων χρονοσειρών σε τμήματα (υπολεκάνες) με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν οι τρεις υπολεκάνες του Ευρώτα: Κλαδάς, Ρασίνα (Κουμουστά) και Ρασίνα (Αεροδρόμιο) προς ανάλυση σε ημερήσια βάση, ενώ η υπολεκάνη του Βιβαρίου μελετήθηκε σε μηνιαίο χρονικό βήμα ώστε να επιτευχθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων. Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου στα επιμέρους τμήματα της λεκάνης απορροής του Ευρώτα εφαρμόστηκε το μοντέλο Thomas “abcd”.

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Πελοποννήσου και έχει συνολική έκταση 1.739 τ.χλμ.. Η μεγαλύτερη έκταση της περιοχής μελέτης βρίσκεται στα όρια του νομού Λακωνίας, ενώ περιλαμβάνει και μικρά τμήματα του νομού Αρκαδίας.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν χωρικά δεδομένα (ψηφιακό μοντέλο εδάφους – υψομέτρων, κάλυψης γης και γεωλογικοί χάρτες). Τα βροχομετρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν λήφθηκαν από πέντε μετεωρολογικούς σταθμούς της λεκάνης, ενώ τα δεδομένα θερμοκρασίας από δύο εξ αυτών. Τα δεδομένα απορροής που εισήχθησαν στο μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου προήλθαν από τους τέσσερις υδρομετρικούς σταθμούς που λειτουργούν στις υπό μελέτη υπολεκάνες, σε ημερήσιο και μηνιαίο χρονικό βήμα. Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής έγινε με τη μέθοδο Penmann Monteith, για την οποία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου από τους σταθμούς της ΕΜΥ στη Σπάρτη και στην Καλαμάτα.

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια αφενός να αναπτυχθούν ημερήσια καθώς και μηνιαία μοντέλα υδατικού ισοζυγίου και αφετέρου να προσδιοριστούν οι παράμετροί τους σε επίπεδο υπολεκάνης, ώστε να επιτευχθεί αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων για τη λεκάνη απορροής του Ευρώτα.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας, βάσει των παραπάνω, είναι η μοντελοποίηση της υδρολογίας των υπολεκανών απορροής του ποταμού Ευρώτα, έτσι ώστε να είναι

εφικτή η κατανόηση του υδατικού ισοζυγίου και, κατ' επέκταση, να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο διαχειριστικό εργαλείο μελέτης των υδατικών πόρων της περιοχής.

## 1.2 Διάρθρωση της εργασίας

Στο 1ο Κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας, προκειμένου να προσδιοριστεί ο στόχος της. Αρχικά, γίνεται μία γενική ανασκόπηση, όπου παρουσιάζεται το πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας και αναφέρονται τα δεδομένα βασικά δεδομένα εισόδου στο μοντέλο υδατικού ισοζυγίου.

Το 2ο Κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα και προσδιορίζεται η γεωγραφική θέση και η διοικητική υπαγωγή της περιοχής μελέτης. Παρουσιάζονται, επιπροσθέτως, οι χρήσεις γης καθώς και τα βασικά γεωλογικά, γεωμορφολογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης περιοχής.

Το 3ο Κεφάλαιο αναφέρεται στην ανάλυση και την επεξεργασία των δεδομένων. Αρχικά, προσδιορίζεται το βροχομετρικό και υδρομετρικό δίκτυο και γίνεται συνοπτική περιγραφή της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε έως την τελική εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στα δεδομένα εισόδου και περιγράφονται αναλυτικά οι μεθοδολογίες που επιλέχθηκαν για την επεξεργασία αυτών. Περιγράφεται, τέλος, η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η ανάπτυξη και η εφαρμογή του μοντέλου του υδατικού ισοζυγίου. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η μεθοδολογία και οι βασικές παράμετροι του μοντέλου Thomas "abcd" και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της μεθόδου στις επιμέρους υπολεκάνες της περιοχής μελέτης. Ακόμα, στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται προσαρμογή των τιμών των παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου με τη μέθοδο της βαθμονόμησης (calibration).

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου του υδατικού ισοζυγίου μετά τη βαθμονόμηση παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων προκειμένου να προσδιοριστεί το μέγεθος της μεταβολής των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε πιθανή μεταβολή κάποιας εκ των παραμέτρων αυτού. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με σχήματα, τα οποία ακολουθεί σύντομη επεξήγηση.

Στο Κεφάλαιο 6, διατυπώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν από την ανάλυση και την επεξεργασία των στοιχείων της μελέτης. Στην αρχή του κεφαλαίου πραγματοποιείται μία σύνοψη των κυριότερων σημείων της παρούσας εργασίας, ενώ στη συνέχεια διατυπώνονται τα συμπεράσματα, τα οποία προέκυψαν. Στο τέλος του κεφαλαίου, διατυπώνονται προτάσεις, τόσο σχετικά με την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, όσο και σχετικά με περαιτέρω έρευνες, σχετικές με το αντικείμενο της εργασίας αυτής.

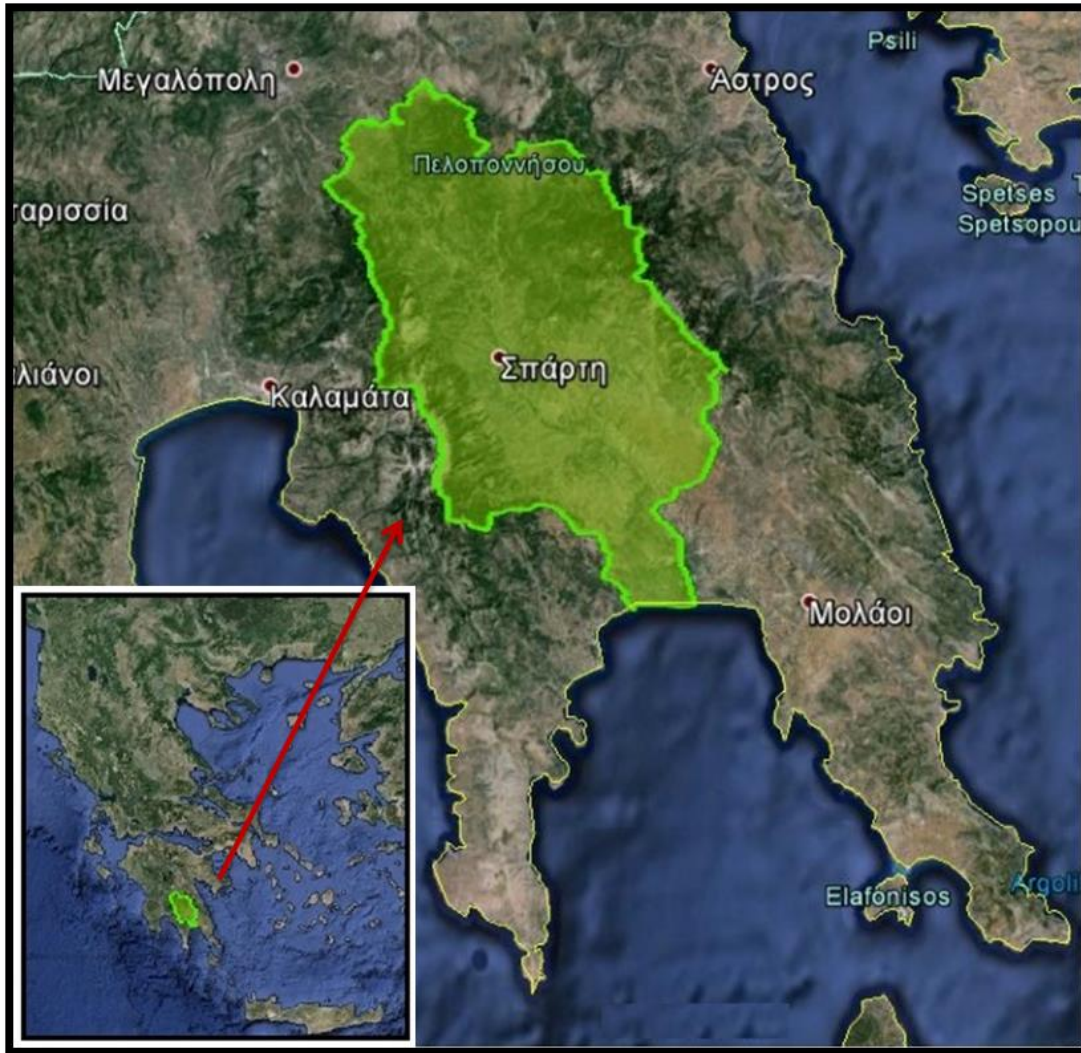
Τέλος, παρατίθεται ο κατάλογος των βιβλιογραφικών αναφορών. Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει αναφορές, που αφορούν τόσο σε έρευνες που παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια της εισαγωγής, όσο και σε έννοιες και μεθόδους, που αναλύθηκαν στο θεωρητικό υπόβαθρο και εφαρμόστηκαν στο μοντέλο.

## 2. Περιγραφή Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Ευρώτα

### 2.1 Γεωγραφική θέση και διοικητική υπαγωγή

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Πελοποννήσου και έχει συνολική έκταση 1.739 τ.χλμ. με κύριο υδατόρευμα μήκους 90 χλμ. Η μεγαλύτερη έκταση της λεκάνης βρίσκεται μέσα στα όρια του Ν. Λακωνίας, ο οποίος συνορεύει βόρεια και βορειοανατολικά με το Ν. Αρκαδίας, δυτικά με το Ν. Μεσσηνίας, νοτιοδυτικά βρέχεται από τον Μεσσηνιακό Κόλπο, νότια από τον Λακωνικό Κόλπο και ανατολικά από το Μυρτώο Πέλαγος. Πρωτεύουσα του Ν. Λακωνίας είναι η Σπάρτη, η οποία βρίσκεται στο ΒΔ τμήμα του νομού, στις όχθες του Ευρώτα, σε υψόμετρο 210 m [Αντωνάκος, 1997].

Ο ποταμός Ευρώτας πηγάζει από την νοτιοανατολική περιοχή του οροπεδίου της Μεγαλόπολης του νομού Αρκαδίας και καθώς διασχίζει τους νομούς Αρκαδίας και Λακωνίας από βορρά προς νότο, δέχεται νερά από πολλούς μικρούς παραπόταμους και χείμαρρους, κυρίως εφήμερου και διακοπτόμενου χαρακτήρα. Οι εκβολές του βρίσκονται στον μυχό του Λακωνικού Κόλπου. Τροφοδοτείται από μια σειρά πηγών, πολλές από τις οποίες βρίσκονται κατά μήκος της κοίτης του και είναι σταθερής ή διαλείπουσας παροχής. Από τα νερά του υδρεύονται οικισμοί και αρδεύεται ένα μεγάλο μέρος της καλλιεργήσιμης έκτασης στη Λακωνία. Στο Σχήμα 2.1 προσδιορίζεται η ευρύτερη περιοχή μελέτης.



Σχήμα 2.1: Προσδιορισμός περιοχής μελέτης

Μέσα στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα βρίσκονται συνολικά περίπου 95 δημοτικά διαμερίσματα από τα οποία τα 90 βρίσκονται στο Ν. Λακωνίας και τα υπόλοιπα ανήκουν στο Ν. Αρκαδίας. Ο συνολικός πληθυσμός της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα ανέρχεται περίπου σε 63.000 κατοίκους (26 κάτοικοι/km<sup>2</sup> από ΕΣΥΕ, απογραφή 2001) και η λεκάνη θεωρείται αραιοκατοικημένη, σε σύγκριση με τις 15 κύριες ποτάμιες λεκάνες των Βαλκανίων (Skoulikidis et al., 2009).

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ο νομός Λακωνίας και οι δήμοι του.



Σχήμα 2.2: Ο νομός Λακωνίας και οι επιμέρους δήμοι του

## 2.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Οι κύριοι ορεινοί όγκοι που οριοθετούν τη λεκάνη απορροής του Ευρώτα είναι ο Ταΰγετος (2.404 m) στα δυτικά και ο Πάρνωνας (1.936 m) στα ανατολικά. Οι δύο οροσειρές χωρίζονται από την πεδιάδα του Ευρώτα. Η υψηλότερη κορυφή του Ταΰγétου είναι ο Προφήτης Ηλίας (2404m) και βρίσκεται στα όρια της λεκάνης. Η υψηλότερη κορυφή του Πάρνωνα είναι η Μεγάλη Τούρλα ή Μαλεβός (1936m) και βρίσκεται βορειότερα της λεκάνης. Μέσα στη λεκάνη βρίσκονται οι δυο επόμενες υψηλότερες κορυφές του Πάρνωνα η Γαϊτανοράχη (1891m) και η Μαδαρή (1686m).

Το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης είναι ορεινό (36,6%) και ημιορεινό (37,8%), ενώ το 25,6% είναι πεδινό. Το πεδινό τμήμα της Λ.Α. καλύπτεται από τις πεδιάδες της Σπάρτης και της Σκάλας που τις χωρίζει το φαράγγι του Βρονταμά. Ο Ευρώτας, πηγάζει από τη νότια πλευρά του οροπεδίου της Μεγαλόπολης (Σκορτσινού) και δέχεται στο ρου του πολλούς μικρούς παραποτάμους εφήμερου και διακοπτόμενου κυρίως χαρακτήρα. Κυριότερος παραπόταμός του είναι ο Οινούντας ο οποίος τροφοδοτεί τον Ευρώτα κατά την μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου.

Τα παράλια της Λακωνίας παρουσιάζουν πολλές κολπώσεις. Περιλαμβάνουν ένα τμήμα των ανατολικών ακτών του Μεσσηνιακού Κόλπου, τον Λακωνικό Κόλπο και τις ανατολικές ακτές του Μυρτώου Πελάγους. Σχηματίζονται δε δύο μεγάλες χερσόνησοι, του Ταινάρου και του Μαλέα. Στις δύο μεγάλες οροσειρές του νομού εμφανίζονται δασικά δέντρα, που αποδίδουν πλούσια και καλή ξυλεία, όπως το έλατο, το πεύκο και η δρυς.

Στην περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα βρίσκονται δυο κύριες κοιλάδες: της Σπάρτης και της Σκάλας. Η κοιλάδα της Σπάρτης ακολουθεί ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση. Στο κέντρο της περίπου παρατηρούνται λοφώδεις εξάρσεις, οι οποίες κατανέμονται γραμμικά, παράλληλα με τη γενική διεύθυνση της κοιλάδας. Η κοιλάδα διατρέχεται κατά μήκος από τον ποταμό Ευρώτα και κατά πλάτος από μια σειρά δευτερευόντων υδρορεμάτων, διαλείπουσας και μόνιμης ροής, με γενική διεύθυνση κάθετη προς τον Ευρώτα, στον οποίο κι εκβάλλουν. Ανατολικά και δυτικά η περιοχή οριοθετείται από τους ορεινούς όγκους του Πάρνωννα και του Ταυγέτου αντίστοιχα (Αντωνάκος, 1997).

Η περιοχή της Σκάλας περιλαμβάνει μια πεδιάδα που καταλήγει στον Λακωνικό κόλπο (νότος) και ορίζεται από μια βόρειο και δυτική λοφώδη περιοχή. Η περιοχή της Σκάλας μπορεί να διακριθεί σε τρεις υποπεριοχές (GWE, 1972):

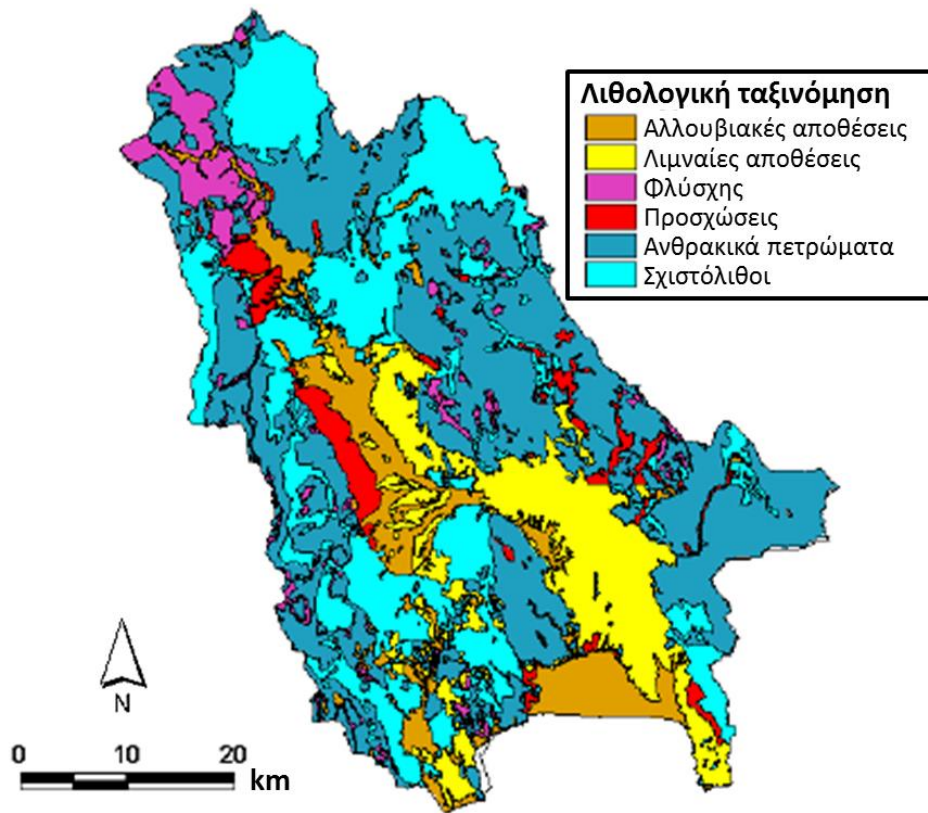
- την περιοχή του Τρινάσσου, δυτικά του ποταμού Ευρώτα,
- την περιοχή του Έλους, ανατολικά του ποταμού Ευρώτα, και
- την περιοχή της Γλυκόβρυσης, η οποία χωρίζεται από την περιοχή του Έλους, από την βόρεια και δυτική λοφώδη περιοχή.

Ο Ευρώτας παρουσιάζεται εγκιβωτισμένος στις εκβολές του στον Λακωνικό κόλπο.

### **2.3 Γεωλογία**

Στη λεκάνη του ποταμού Ευρώτα απαντούν σε ποσοστό 49% ασβεστόλιθοι και 29% σχιστόλιθοι (Verhoosij et al., 2011). Η λεκάνη έχει πληρωθεί από μεταλλικές ιζηματογενείς αποθέσεις διαφόρων ηλικιών. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται ο χάρτης με τη λιθολογία της περιοχής.





**Σχήμα 2.3.** Λιθολογικός χάρτης λεκάνης π. Ευρώτα (Πηγή: Cazemier et al., 2011. Με τροποποιήσεις).

Στη Λ.Α. του Ευρώτα απαντούν πετρώματα που ανήκουν στις ενότητες Πίνδου, Τρίπολης Άρνας και Μάνης. Στα ΒΔ της λεκάνης απαντά η ενότητα Πίνδου παρουσιάζει τη μικρότερη εξάπλωση από όλες της ενότητες κυρίως, με τη μορφή υπολειμματικών καλυμμάτων. Αποτελείται κυρίως από λεπτοπλακώδεις, πολυπτυχωμένους, ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και κλαστικούς σχηματισμούς του «Πρώτου Φλύσχη». Η ενότητα Τρίπολης παρουσιάζει μικρή εξάπλωση στα ΒΔ της λεκάνης (Ταΰγετος), ενώ παρουσιάζει μεγάλη εξάπλωση στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης (περιοχή Πάρνωννα). Στη βάση της στρωματογραφικής κολόνας απαντά ένα ηφαιστειοζηματογενές σύμπλεγμα, πάνω από αυτό απαντούν νηριτικοί ασβεστόλιθοι και τέλος πάνω από τους ασβεστόλιθους εμφανίζεται ο φλύσχος. Οι σχηματισμοί της ενότητας Τρίπολης υπέρκεινται τεκτονικά των φυλλιτών – χαλαζιτών της ενότητα Άρνας, ή έρχονται σε πλευρική επαφή με αυτούς λόγω της παρουσίας ρηγμάτων.

Η ενότητα Άρνας απαντά στην περιοχή Ταυγέτου στο ΒΔ και το ΝΔ τμήμα της λεκάνης, καθώς και στο ΒΑ ανατολικό (περιοχή Πάρνωννα). Αποτελείται από φυλλίτες – χαλαζίτες που υπέρκεινται τεκτονικά των σχηματισμών της ενότητας Μάνης.

Η ενότητα Μάνης απαντά κυρίως στον Ταυγέτο και τον Πάρνωννα και αποτελεί την σχετικά αυτόχθονη ενότητα της περιοχής. Στα κατώτερα τμήματα της στρωματογραφικής κολόνας απαντούν φυλλίτες-χαλαζίτες, ακολούθως υπέρκεινται συνήθως τεκτονικά ανθρακικά πετρώματα (καρστικοποιημένα άστρωτα έως παχυπλακώδη ανθρακικά ελαφρά μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα) Παντοκράτορα). Πάνω από τον σχηματισμό Παντοκράτορα η κολόνα συνεχίζεται με σχιστόλιθους και πυριτικούς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και ακολούθως ο σχηματισμός «Βίγλας» που είναι καθαυτό Plattenkalk (πλακώδεις ασβεστόλιθοι). Πρόκειται για λεπτο-μεσοστρωματώδεις βιτουμενιούχους με κονδύλους πυριτόλιθων, οι οποίοι στα ανώτερα τμήματα εξελίσσονται σε πολύχρωμα σιπολινομάρμαρα, κοντά στη μετάβαση προς τον ελαφρά μεταμορφωμένο φλύσχη .

Επιπλέον, στις λεκάνες (τεκτονικά βυθίσματα) απαντούν μεταλλικές αποθέσεις ποικίλων φάσεων και λιθολογιών. Τα τεκτονικά βυθίσματα αυτά από τα ανάντη προς τα κατόντη είναι: της Πελλάνας, της Σπάρτης, των Αιγίων (βόρεια του Γυθείου) και το τεκτονικό βύθισμα Σκάλας – Έλους .

Η δραστηριότητα της ρηξιγενούς ζώνης του Ταυγέτου κατά το Τεταρτογενές έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κώνων κορημάτων που καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση και έχουν σημαντικό πάχος. Οι κώνοι κορημάτων αποτελούνται από κροκάλες, λατύπες και λεπτομερές υλικό που προέρχονται από τη διάβρωση των σχηματισμών που απαντούν στα ανατολικά πρηνή του Ταυγέτου, δηλαδή φυλλίτες – χαλαζίτες και μάρμαρα Μάνης τα οποία είναι αδιαβάθμητα και χαλαρά συγκολλημένα μεταξύ τους.

Κάτω από τους κώνους κορημάτων απαντούν Πλειο-Πλειστοκαινικοί λιμναίοι σχηματισμοί και αποτελούνται από διάφορες λιθολογίες. Μπορούν να διακριθούν σε συνεκτικά ανθρακικά κροκαλοπαγή που εναλλάσσονται με μάργες και ψαμμίτες (Πλειο-πλειστόκαινο) και σε ένα υπερκείμενο σχηματισμό που αποτελείται από αργίλους, άμμους, λατύπες και κροκαλοπαγή (Πλειστόκαινο). Στο νότιο τμήμα της λεκάνης και στην ευρύτερη περιοχή εκτός από λιμναίοι σχηματισμοί απαντούν πλέον και θαλάσσιοι αποτελούμενοι από ασβεστοψαμμιτικούς και αμιγείς αργίλους, τεφρές μάργες και αραιές στρώσεις οργανογενών ψαμμιτικών ασβεστολίθων Πλειοκαινικής ηλικίας.

Πάνω από όλους τους προαναφερθέντες σχηματισμούς απαντούν οι αλλουβιακές αποθέσεις που καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση εξαιτίας της μεγάλης μεταφορικής ικανότητας του ποτάμιου συστήματος του Ευρώτα.

Ένα πολύ μεγάλο μέρος της λεκάνης καλύπτεται από τους αλπικούς σχηματισμούς. Ο τεκτονικός ιστός της περιοχής όπου απαντούν οι αλπικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζεται από την παρουσία πτυχώσεων, λεπιώσεων και ρηγμάτων. Σπουδαίο ρόλο στην εικόνα που παρουσιάζει σήμερα ο αλπικός τεκτονικός ιστός έχουν παίξει οι μετακαλυμματικές ολισθήσεις και η νεοτεκτονική παραμόρφωση. Οι μεταλπικές αποθέσεις έχουν επηρεασθεί από τη νεοτεκτονική παραμόρφωση που εκφράζεται κυρίως με ρήγματα και περιστροφές ρηξιτεμαχών.

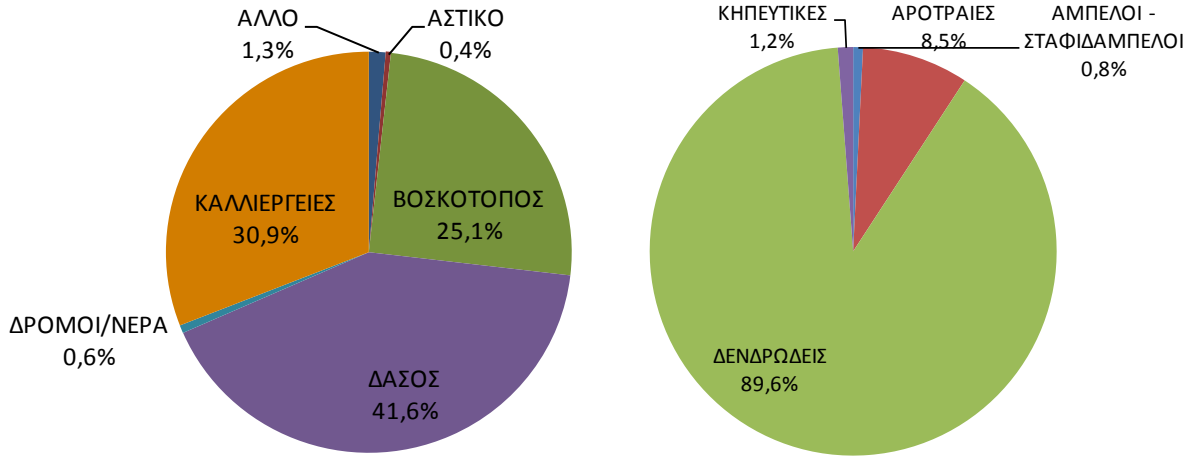
Αποτέλεσμα του έντονου τεκτονισμού των ορεινών όγκων της Λ.Α. του Ευρώτα είναι η υψηλή διαβρωσιμότητα των πετρωμάτων, τα οποία κατακερματίζονται, δημιουργούν κώνους κορημάτων που στη συνέχεια μεταφέρονται με την υδραυλική δύναμη των ορεινών ρεμάτων στα χαμηλότερα τμήματά τους και στο κύριο ρου του Ευρώτα. Στο υλικό αυτό όσο και στις Πλειστοκαινικές αποθέσεις οφείλει τη σύστασή της η κοίτη του κύριου ρου του Ευρώτα που αποτελείται από μπλοκ, λατύπες, κροκάλες και λεπτόκοκκο υλικό.

#### **2.4 Χρήσεις γης**

Στην περιοχή της λεκάνης , διακρίνονται οι παρακάτω βασικές κατηγορίες χρήσεων γης:

- Δάση και δασικές εκτάσεις: 42%,
- Γεωργική γη, σε ποσοστό: 31%,
- Βοσκότοποι, σε ποσοστό: 25% και
- Αστικές και άλλες χρήσεις: 2%.

Συνολικά, στην περιοχή της ΛΑΠ Ευρώτα, υπάρχουν σημαντικές γεωργικές, δασικές και ημιδασικές εκτάσεις, που κατανέμονται με βάση την επιφάνειά τους επί της συνολικής έκτασης της λεκάνης, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.4.



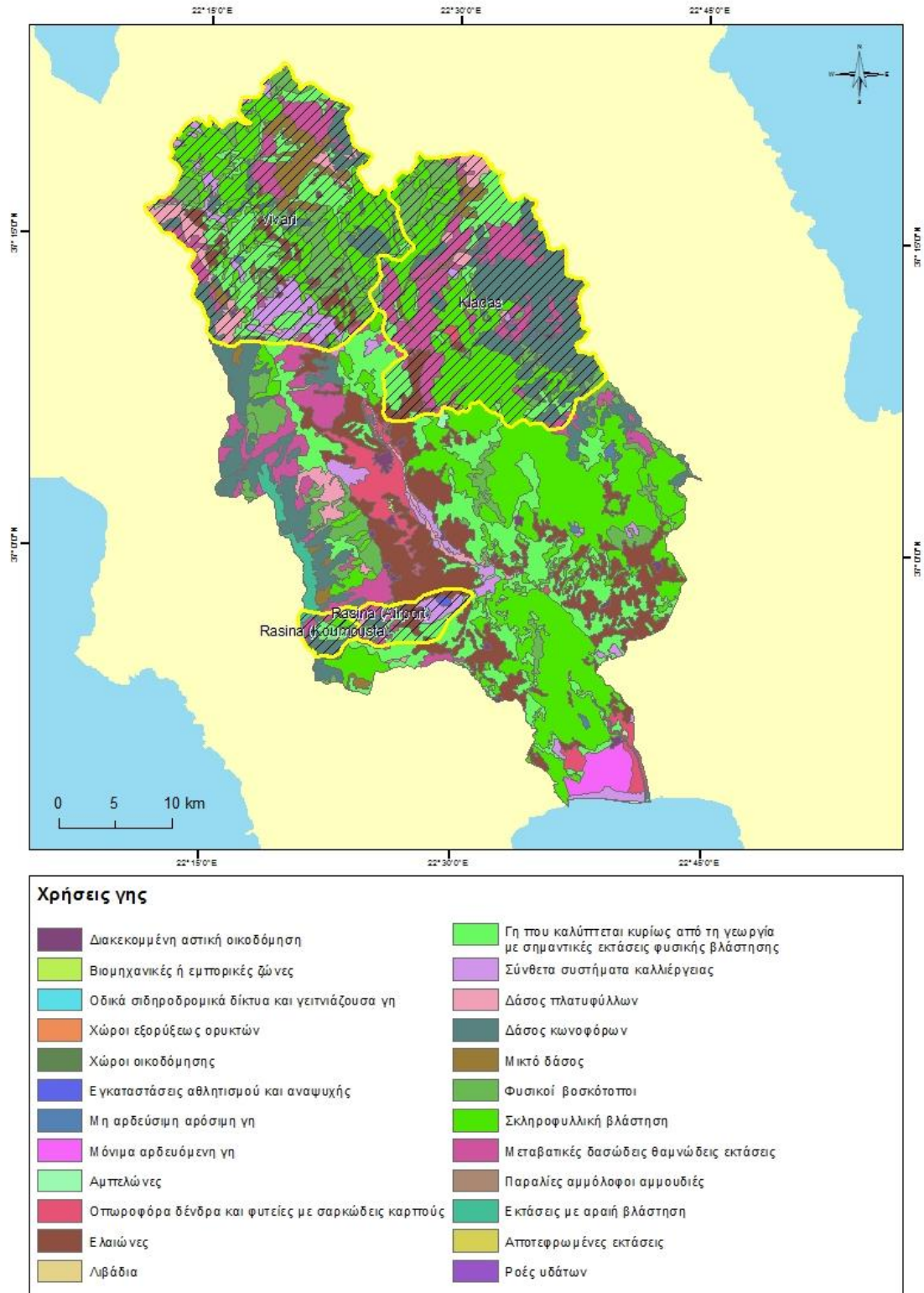
**Σχήμα 2.4.** Κατανομή χρήσεων γης και καλλιεργειών στη ΛΑΠ Ευρώτα (Σχέδιο Διαχείρισης ΛΑΠ Ανατολικής Πελοποννήσου (ΥΔ 03),GR33)

Ειδικότερα σε ό,τι αφορά τις εκτάσεις καλλιεργειών, στην περιοχή της ΛΑΠ σήμερα υπάρχουν συνολικά περίπου 491.000 στρέμματα καλλιεργούμενης γης. Σε αυτές τις εκτάσεις διακρίνουμε: 4.000 στρ. αμπέλων και σταφιδαμπέλων, 38.000 στρ. αροτραίων, 443.000 στρ. δενδρωδών και 6.000 στρ. κηπευτικών. Οι ανωτέρω εκτάσεις δίνονται με βάση τις τελευταίες διαθέσιμες σχετικές απογραφές της ΕΛ.ΣΤΑΤ. για το έτος 2007.

Οι κύριες δραστηριότητες στη λεκάνη απορροής είναι η γεωργία (κτηνοτροφία και μια ποικιλία καλλιεργειών, που περιλαμβάνει ελιές και εσπεριδοειδή) και μικρής κλίμακας βιομηχανίες επεξεργασίας τροφίμων.

Το σχήμα 2.5 παρουσιάζει την κατανομή των διαφόρων χρήσης γης στη λεκάνη απορροής του Ποταμού Ευρώτα.

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ Π.ΕΥΡΩΤΑ



Σχήμα 2.5: Χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του Ευρώτα (πηγή: Corine 2000)

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ Π.ΕΥΡΩΤΑ

Ο νομός Λακωνίας έχει έκταση 3.636 km<sup>2</sup>, πληθυσμό (2001): 99.637, Κατανομή πληθυσμού: Αγροτικός: 67.810, Αστικός: 31.827, Δήμοι :22, Πρωτεύουσα: Σπάρτη, Βουνά: Ταΰγετος, Πάρνωνας, Σαγιάς, Ποτάμια: Ευρώτας. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι δήμοι του νομού Λακωνίας, ο πληθυσμός τους και η κατανομή του πληθυσμού σε αστικό και αγροτικό.

Πίνακας 2.1: Κατανομή πληθυσμού του νομού Λακωνίας

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΔΗΜΟΥ	ΣΥΝΟΛΟ	ΑΣΤΙΚΟΣ	ΑΓΡΟΤΙΚΟΣ
Δ. ΣΠΑΡΤΗΣ	18.184	15.828	2.356
Δ. ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΑΝΗΣ	2.111	0	2.111
Δ. ΑΣΩΠΟΥ	4.187	0	4.187
Δ. ΒΟΙΩΝ	7.871	2.751	5.120
Δ. ΓΕΡΟΝΘΡΩΝ	1.959	0	1.959
Δ. ΓΥΘΕΙΟΥ	7.926	4.876	3.050
Δ. ΕΛΟΥΣ	6.452	2.396	4.056
Δ. ΖΑΡΑΚΑ	1.538	0	1.538
Δ. ΘΕΡΑΠΝΩΝ	3.062	0	3.062
Δ. ΚΡΟΚΕΩΝ	2.824	0	2.824
Δ. ΜΟΛΑΩΝ	5.597	3.021	2.576
Δ. ΜΟΝΕΜΒΑΣΙΑΣ	4.660	0	4.660
Δ. ΜΥΣΤΡΑ	4.608	0	4.608
Δ. ΝΙΑΤΩΝ	2.666	0	2.666
Δ. ΟΙΝΟΥΝΤΟΣ	2.625	0	2.625
Δ. ΟΙΤΥΛΟΥ	5.203	0	5.203
Δ. ΠΕΛΛΑΝΑΣ	3.405	0	3.405
Δ. ΣΚΑΛΑΣ	5.902	2.955	2.947
Δ. ΣΜΗΝΟΥΣ	1.917	0	1.917
Δ. ΦΑΡΙΔΟΣ	5.269	0	5.269
ΚΟΙΝ. ΕΛΑΦΟΝΗΣΟΥ	745	0	745
ΚΟΙΝ. ΚΑΡΥΩΝ	926	0	926

### 2.5 Κλίμα

Η λεκάνη απορροής του Ευρώτα παρουσιάζει τυπικό μεσογειακό κλίμα με θερμά καλοκαίρια και ψυχρούς χειμώνες, με μέση ετήσια θερμοκρασία, που φτάνει περίπου τους 16°C. Η περιοχή είναι πλούσια σε βροχοπτώσεις. Το πλείστο των βροχοπτώσεων παρουσιάζεται κατά τους μήνες Οκτώβριο ως και Μάρτιο, με πιο υγρό μήνα το Δεκέμβριο και πιο ξηρό τον Ιούνιο. Αντίστοιχα, η μέση υπερετήσια δυναμική εξατμισοδιαπνοή κατά Thornthwaite έχει καθοριστεί για την περιοχή σε 668 mm ισοδύναμου ύψους βροχής (Μελέτη Λιμνοδεξαμενών Νομού Λακωνίας, 1993).

Η ορεινή περιοχή παρουσιάζει βαρύ χειμώνα, μεγάλες διακυμάνσεις θερμοκρασίας μεταξύ θερμής και ψυχρής περιόδου και μεταξύ ημέρας και νύχτας, εμφάνιση παγετών από Οκτώβριο ως Απρίλιο και βροχοπτώσεις κατανεμημένες σε όλη τη

διάρκεια του έτους. Οι άνεμοι που επικρατούν είναι βορειοανατολικοί και σπανιότερα νοτιοδυτικοί. Χαρακτηριστικά είναι επίσης τα φαινόμενα ομίχλης και παγετού στα πεδινά, κυρίως στη διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα.

#### *«Ομβροθερμικό» διάγραμμα*

Οι Gausseu και Bagnauls (1957) έχουν απεικονίσει σε ένα διάγραμμα, που καλείται "ομβροθερμικό" την πορεία μήνα προς μήνα της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας σε °C και του μέσου μηνιαίου ύψους βροχής σε mm. Σύμφωνα με το διάγραμμα ένας μήνας ορίζεται ως ξηρός, όταν:

$$P' < 2T'$$

όπου  $P'$  και  $T'$  οι μέσες μηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας, σε mm και °C, αντίστοιχα. Το διάγραμμα αυτό έχει στην τετμημένη τους μήνες τους έτους και στις τεταγμένες (δύο), στη δεξιά τις μηνιαίες βροχοπτώσεις ( $P$ , mm) και στην αριστερή τις μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες ( $T$ , °C) σε κλίμακα διπλάσια των βροχοπτώσεων. Η επιφάνεια που περικλείεται από τις καμπύλες βροχόπτωσης και θερμοκρασίας μεταξύ των δύο σημείων των τομών δείχνει τη διάρκεια και την ένταση της ξηράς περιόδου. Υψηλότερες θερμοκρασίες έχουν ως αποτέλεσμα υψηλότερες απώλειες από την εξάτμιση και τη διαπνοή.

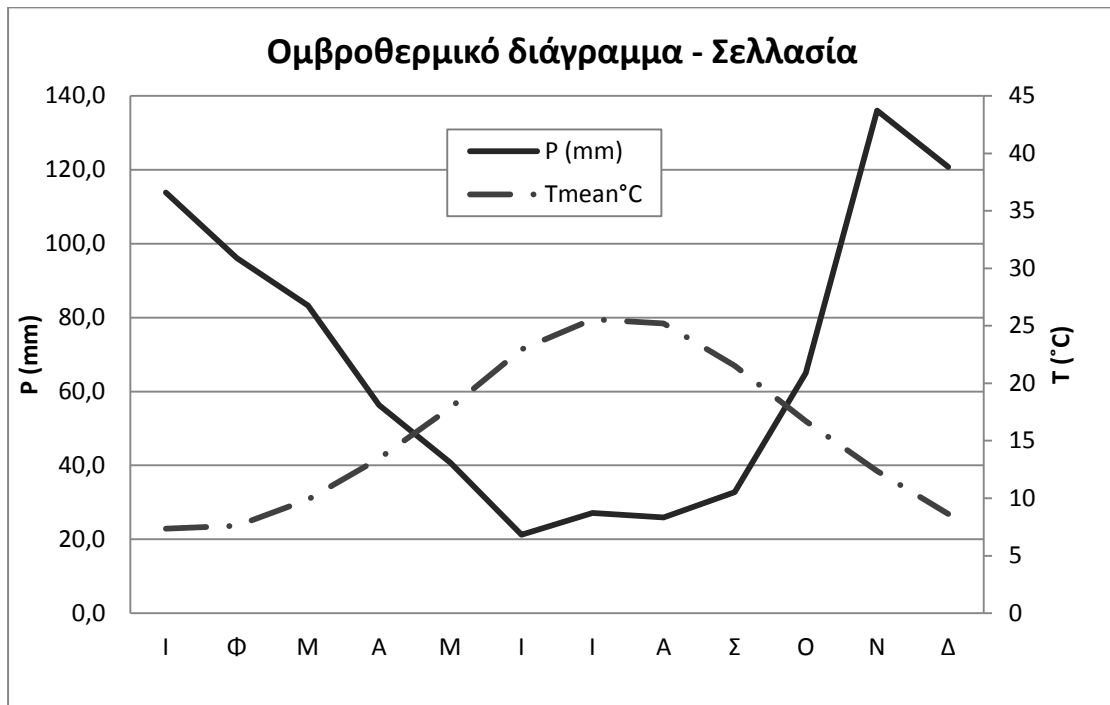
Με βάση το γεγονός ότι ο βαθμός της βιολογικής ξηρασίας εξαρτάται από την υγρασία του αέρα, ο Gausseu συμπλήρωσε την παραπάνω εξίσωση και χαρακτήρισε ένα μήνα ως ξηρό, όταν το ύψος βροχόπτωσης είναι:

- a. Λιγότερο από 10 mm και η μέση μηνιαία θερμοκρασία είναι μικρότερη από 10°C.
- b. Λιγότερο από 25 mm και η μέση μηνιαία θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20°C.
- c. Λιγότερο από 50 mm και η μέση μηνιαία θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30°C.
- d. Λιγότερο από 75 mm και η μέση μηνιαία θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από 30°C.

Τα ομβροθερμικά διαγράμματα έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες συσχέτισης της βλάστησης ενός τόπου με τον κλιματικό του τύπο. Επιτρέπουν τον γρήγορο και εύκολο διαχωρισμό σημαντικά διαφορετικών κλιμάτων, αλλά δεν είναι αποτελεσματικά στην ανίχνευση παραπλήσιων κλιματικών τύπων. Αυτός είναι ο λόγος χρήσης των κλιματικών δεικτών, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από σαφή

αριθμητικά όρια, με βάση τα οποία γίνεται ο διαχωρισμός των διαφόρων κλιματικών τύπων.

Οι εκτιμημένες μέσες μηνιαίες τιμές της θερμοκρασίας και της βροχόπτωσης είναι απαραίτητες για τη σχεδίαση των ομβροθερμικών διαγραμμάτων κάθε τόπου. Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται το ομβροθερμικό διάγραμμα στην περιοχή της Σελλασίας. Οι μονάδες μέτρησης στον δεξιό κατακόρυφο άξονα της βροχόπτωσης είναι διπλάσιες σε σχέση με εκείνες στον αριστερό κατακόρυφο άξονα της θερμοκρασίας. Στον οριζόντιο άξονα σημειώνονται οι μήνες του έτους.



**Σχήμα 2.6:** «Ομβροθερμικό» διάγραμμα στην περιοχή της Σελλασίας

Όπως απεικονίζεται στο παραπάνω Σχήμα 2.6 φαίνεται ότι η ξηρή περίοδος για την περιοχή της Σελλασίας είναι από τα μέσα του Απριλίου έως τα μέσα Σεπτεμβρίου. Στους μήνες αυτούς η τιμή της βροχόπτωσης είναι μικρότερη από τη διπλάσια τιμή της θερμοκρασίας της αντίστοιχης περιόδου.



### **3. Ανάλυση - Επεξεργασία Δεδομένων**

Το πειραματικό σχέδιο δειγματοληψίας της υδρολογίας της λεκάνης απορροής εστιάζει στη συλλογή μιας ποικιλίας δεδομένων για τον περιορισμό των διαδικασιών σε διάφορες κλίμακες, δεδομένου των υφιστάμενων δημοσιονομικών περιορισμών και της μεγάλης έκτασης της λεκάνης.

Η προσομοίωση της υδρολογίας του Ευρώτα ποταμού απαιτεί χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων (βροχόπτωση, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, θερμοκρασία σημείου δρόσου, ηλιακή ενέργεια, ταχύτητα ανέμου και ποσοστό ηλιοφάνειας) σε ημερήσιο χρονικό βήμα και παροχές του ποταμού σε ανάντη θέσεις (αν υπάρχει τέτοια περίπτωση).

Η επεξεργασία των δεδομένων και η δημιουργία όλων των χαρτών έγινε σε περιβάλλον GIS 10 (Geographical Information Systems – ΓΣΠ – Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών).

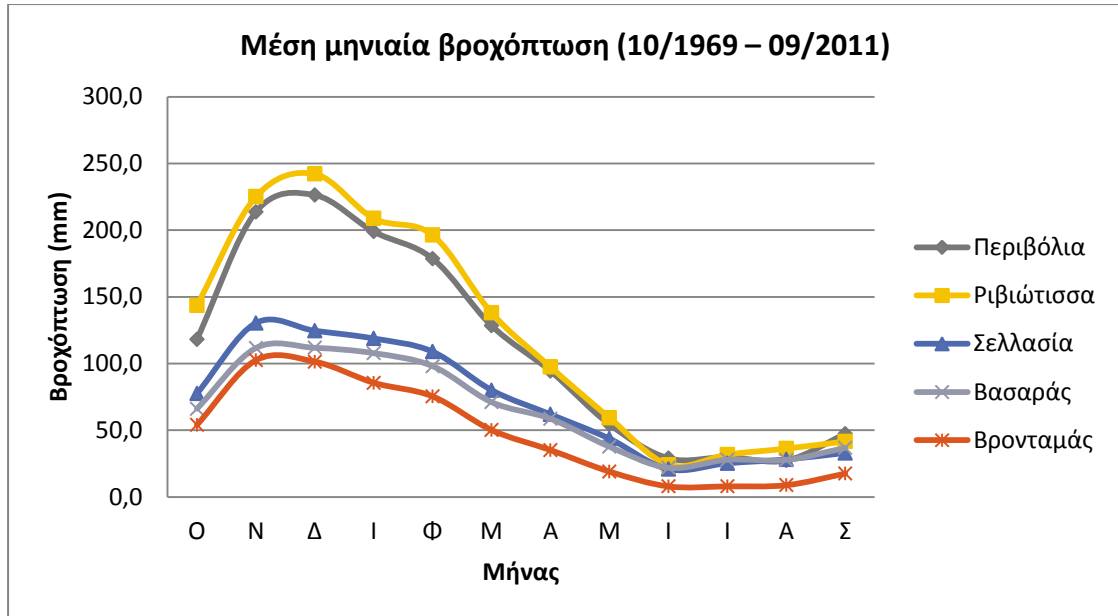
#### **3.1 Το δίκτυο μετρήσεων**

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν για επεξεργασία δεδομένα από τους μετεωρολογικούς και υδρολογικούς σταθμούς που είναι τοποθετημένοι σε κατάλληλες θέσεις στην εν λόγω λεκάνη απορροής (Σχήμα 3.1).



**Σχήμα 3.1.** Δίκτυο μετεωρολογικών (κόκκινο τρίγωνο) και υδρομετρικών σταθμών (μπλε κύκλος) της Λεκάνης Απορροής του Ευρώτα.

Οι ημερήσιες βροχοπτώσεις έχουν προκύψει από τις καταγραφές των πέντε βροχομετρικών σταθμών: Περιβολίων, Βασαρά, Σελασίας, Ριβιώτισσας και Βρονταμά, η θέση των οποίων φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Τα σύγχρονα ημερήσια δεδομένα ήταν διαθέσιμα για την περίοδο 10/1969 – 09/2011. Παρακάτω στον Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις για κάθε σταθμό για την περίοδο 1969-2011.



**Σχήμα 3.2:** Μέσες μηνιαίες βροχοπτώσεις για τους σταθμούς Περιβόλια, Ριβιώτισσα, Βασαράς, Σελλασία και Βρονταμάς.

Υπάρχουν έξι υδρομετρικοί σταθμοί για τον Ευρώτα και τους παραποτάμους του, όπως φαίνεται στον Σχήμα 3.2. Δύο από αυτούς, στον Βρονταμά και το Βιβάρι, βρίσκονται στο κεντρικό ποτάμι, δύο είναι στον παραπόταμο του Οινούντα και δύο στον παραπόταμο της Ρασίνας. Οι έξι υπολεκάνες αλληλοεπικαλύπτονται σε μερικά τμήματα.

### 3.2 Συνοπτική παρουσίαση μεθοδολογίας



Στο παραπάνω διάγραμμα ροής παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν στην παρούσα εργασία. Αφού προσδιορίστηκε η περιοχή μελέτης, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, έγινε η επιλογή των δεδομένων προς επεξεργασία. Για την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων δημιουργήθηκε το υδρογραφικό δίκτυο και εισήχθη το ψηφιακό μοντέλο εδάφους σε περιβάλλον GIS. Ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων κατακρήμνισης, μέσω του GIS δημιουργήθηκαν τα πολύγωνα Thiessen με σκοπό την εκτίμηση και τον υπολογισμό της μέσης επιφανειακής βροχόπτωσης. Την παραπάνω διαδικασία ακολούθησε η επεξεργασία των μετεωρολογικών δεδομένων, ούτως ώστε να εκτιμηθεί η εξατμισοδιαπνοή με τη μέθοδο Penmann-Monteith. Για την εφαρμογή του μοντέλου Thomas απαραίτητη ήταν η διαδικασία της επιλογής και επεξεργασίας των υδρολογικών δεδομένων, που ακολούθησε. Τέλος, αφού έγινε βαθμονόμηση και ανάλυση ευαισθησίας στο μοντέλο εξάχθηκαν τα αποτελέσματα και κατ' επέκταση τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη.

### 3.3 Κατακρημνίσματα

#### 3.3.1 Περιγραφή Δεδομένων

Στην περιοχή οι μετεωρολογικοί σταθμοί και από τους οποίους προέκυψαν τα ημερήσια δεδομένα είναι ο σταθμός της Ριβιώτισσας σε υψόμετρο 163,5 m, του Βρονταμά, σε υψόμετρο 280 m, των Περιβολιών (Καστόριο) σε υψόμετρο 490 m, της Σελλασίας σε υψόμετρο 590 m, του Βασαρά σε υψόμετρο 646 m. Τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν στην περίοδο 1969-1911. Η μέση υπερετήσια βροχόπτωση στους σταθμούς αυτούς κυμαίνεται μεταξύ 1341 mm (Περιβόλια) και 565 mm (Βρονταμάς) 1969-2011.

Από το σύνολο των καταγεγραμμένων βροχοπτώσεων το έτος 1989-1990 παρουσιάζεται ως το ξηρότερο με μέσο ύψος βροχόπτωσης 464,5 mm. Τοπικά μάλιστα, ο σταθμός του Βρονταμά κατέγραψε, για το έτος αυτό, μέση ετήσια βροχόπτωση 227,6 mm (μέση υπερετήσια βροχόπτωση: 565 mm, 1969-2011). Ακολουθεί το 2007 το οποίο ήταν ένα από τα ξηρότερα έτη της τελευταίας 35-ετίας. Ενδεικτικά, στην περιοχή της Σελλασίας, το 2007 ακολούθησε σε ξηρότητα το 1977 και τα ξηρά έτη της περιόδου 1988-92, με ύψος βροχής 488 mm έναντι 1445 mm της μέσης υπερετήσιας βροχόπτωσης στον σταθμό αυτό για την περίοδο 1969-2011. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται το μέσο υψόμετρο καθώς και η μέση υπερετήσια βροχόπτωση για τον εκάστοτε μετεωρολογικό σταθμό.

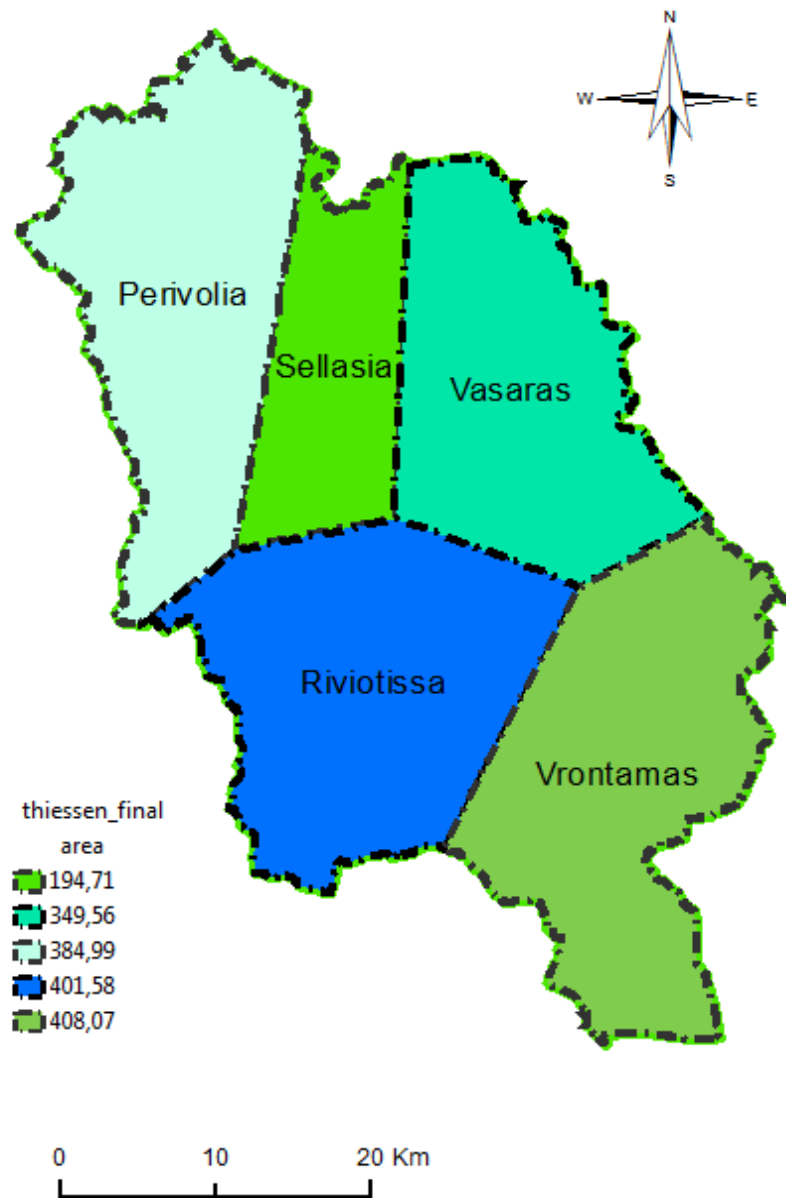
**Πίνακας 3.1:** Μέσο υψόμετρο & μέση υπερετήσια βροχόπτωση για κάθε μετεωρολογικό σταθμό

A/A	Σταθμός	Μέσο υψόμετρο (m)	Μέση υπερετήσια $P_i$ (mm)
1	<i>Περιβόλια</i>	490	1340,54
2	<i>Σελλασία</i>	590	1444,07
3	<i>Βασαράς</i>	646	852,77
4	<i>Ριβιώτισσα</i>	163,5	776,71
5	<i>Βρονταμάς</i>	280	564,97

### 3.3.2 Επεξεργασία Δεδομένων

Για την ανάπτυξη του υδρολογικού μοντέλου abcd και την επίλυση του θέματος, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα τα οποία διατίθενται, ύστερα από την αναγκαία επεξεργασία αυτών.

Για τους 5 συνολικά βροχομετρικούς σταθμούς δημιουργήθηκαν τα πολύγωνα του Thiessen στο περιβάλλον ArcMap GIS 10, με στόχο τη χρήση της αντίστοιχης μεθόδου για τον υπολογισμό του μέσου ύψους βροχής ανά υπολεκάνη. Με τη μέθοδο αυτή γίνεται αναγωγή του σημειακής βροχόπτωσης, όπως καταγράφηκε σε κάθε σταθμό, σε επιφανειακή βροχόπτωση στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης. Στο πρόγραμμα εισήχθησαν οι συντεταγμένες των μετεωρολογικών σταθμών και εκτελέστηκε ο αλγόριθμος «Create Thiessen Polygons». Τα πολύγωνα του Thiessen παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3. Πολύγωνα Thiessen βροχομετρικών σταθμών περιοχής μελέτης

Επόμενο βήμα αποτέλεσε η επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχόπτωσης. Για το σκοπό αυτό, ο υπολογισμός των βαρών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πολυγώνων Thiessen, όπως προέκυψε από το GIS. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας παρουσιάζονται παρακάτω. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2 μεγαλύτερο βάρος στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα παρουσιάζει ο σταθμός του Βρονταμά (23.5 %), ενώ η χαμηλότερη τιμή (11.2%) παρατηρείται στο σταθμό της Σελλασίας.

Πίνακας 3.2: Συντελεστές βάρους σταθμών μεθόδου Thiessen

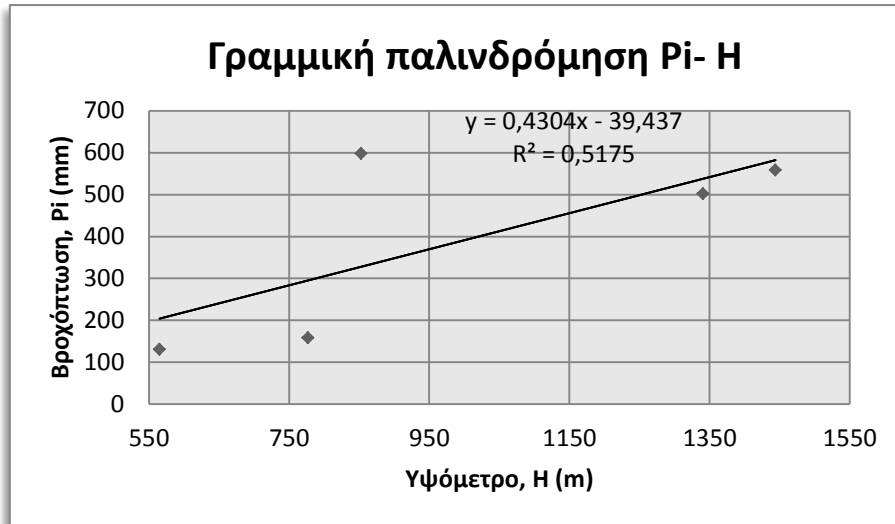
<b>Μέσο υψόμετρο λεκάνης (m)</b>	619,86
<b>Ε<sub>λεκάνης</sub> (km<sup>2</sup>)</b>	1738,91

<b>ΣΤΑΘΜΟΣ</b>	<b>Εμβαδόν Thiessen (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Wi</b>
<i>Περιβόλια</i>	384,99	0,221
<i>Σελλασία</i>	194,71	0,112
<i>Βασαράς</i>	349,56	0,201
<i>Ριβιώτισσα</i>	401,58	0,231
<i>Βρονταμάς</i>	408,07	0,235
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>2672,83</b>	<b>1,00</b>

Ωστόσο, η μέθοδος Thiessen δε λαμβάνει υπόψη το πραγματικό μέσο υψόμετρο της λεκάνης, αλλά το υψόμετρο των σταθμών. Για το λόγο αυτό, απαιτείται διόρθωση της επιφανειακής βροχόπτωσης που προκύπτει με τη μέθοδο και αναγωγή της υπολογισθείσας βροχής στο υψόμετρο των 619,86 m, που αποτελεί το μέσο υψόμετρο της υπό μελέτη λεκάνης.

Για να πραγματοποιηθεί αυτό, αναγκαίο βήμα αποτελεί η εκτίμηση της βροχοβαθμίδας της λεκάνης. Αυτή εκτιμάται προβάλλοντας σε κοινό διάγραμμα τη μέση ετήσια βροχόπτωση κάθε σταθμού με το αντίστοιχο υψόμετρο του σταθμού (όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1) και θεωρώντας τη σχέση των δύο ως γραμμική, προκύπτει η βροχοβαθμίδα ως η κλίση της ευθείας τάσης.





**Σχήμα 3.4:** Διάγραμμα μέσο ετήσιο υψόμετρο υπολεκανών – υψόμετρο βροχομετρικών σταθμών για εκτίμηση της βροχοβαθμίδας για τη λεκάνη

Έτσι, το ανοιγμένο επιφανειακό ύψος βροχής για κάθε μέρα της υπό μελέτη περιόδου δίδεται από την εξίσωση:

$$P_t' = P_t + \lambda * \Delta h$$

Όπου:

$P_t$ : συνολική επιφανειακή βροχόπτωση κατά Thiessen

$\lambda$ : βροχοβαθμίδα (mm/100m)

$\Delta h$ : διαφορά του μέσου σταθμισμένου υψόμετρου από τη μέθοδο Thiessen από το πραγματικό μέσο υψόμετρο της λεκάνης.

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την υπό μελέτη λεκάνη, ύστερα από την εφαρμογή της μεθόδου.

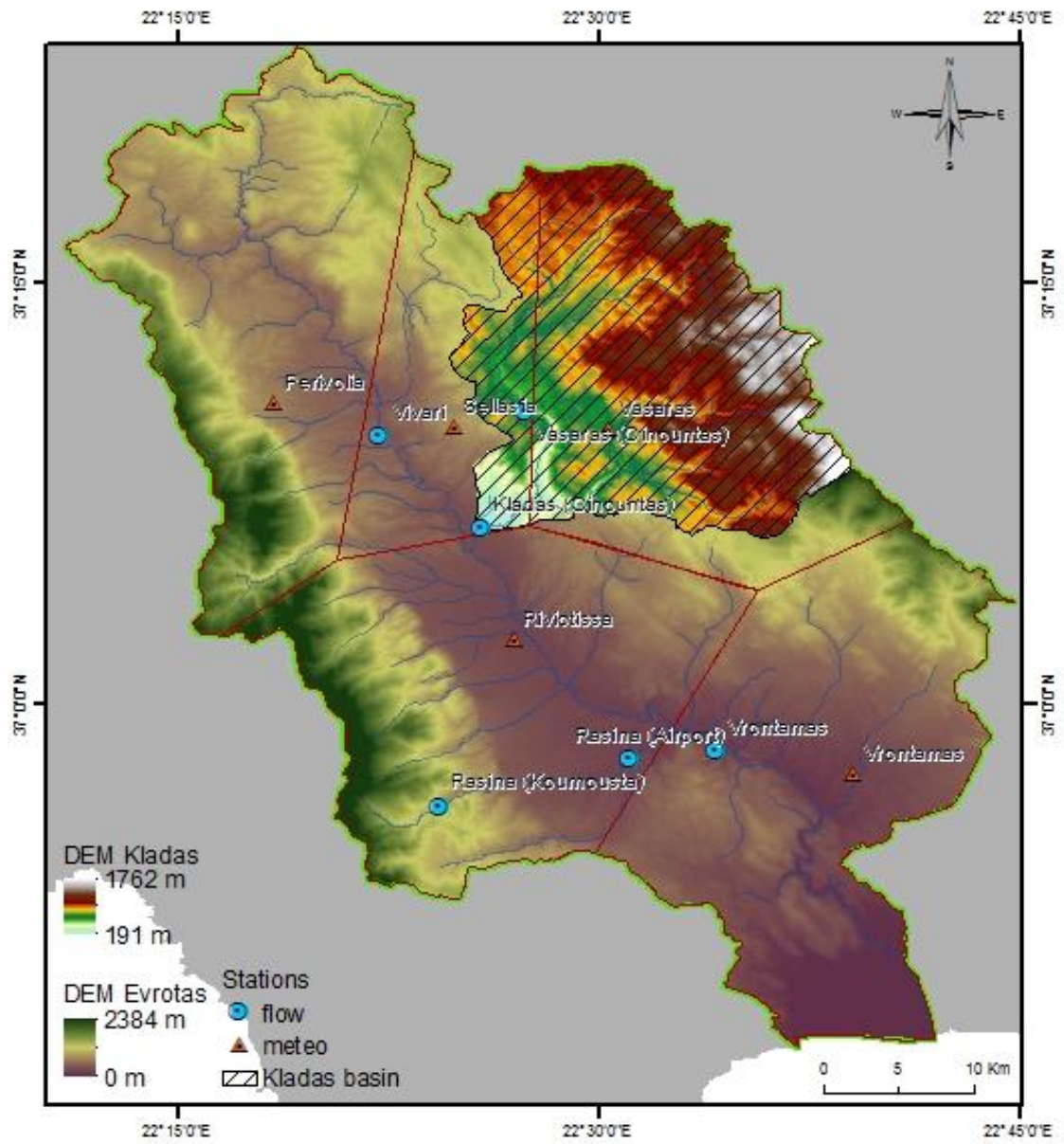
**Πίνακας 3.3:** Υπολογισμός συντελεστή αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης.

<b><math>\Delta h</math></b>	259,03
<b>Βροχοβαθμίδα (mm/100m)</b>	43,04
<b><math>P_t</math> (mm)</b>	472,32
<b>Συντελεστής αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης</b>	1,31

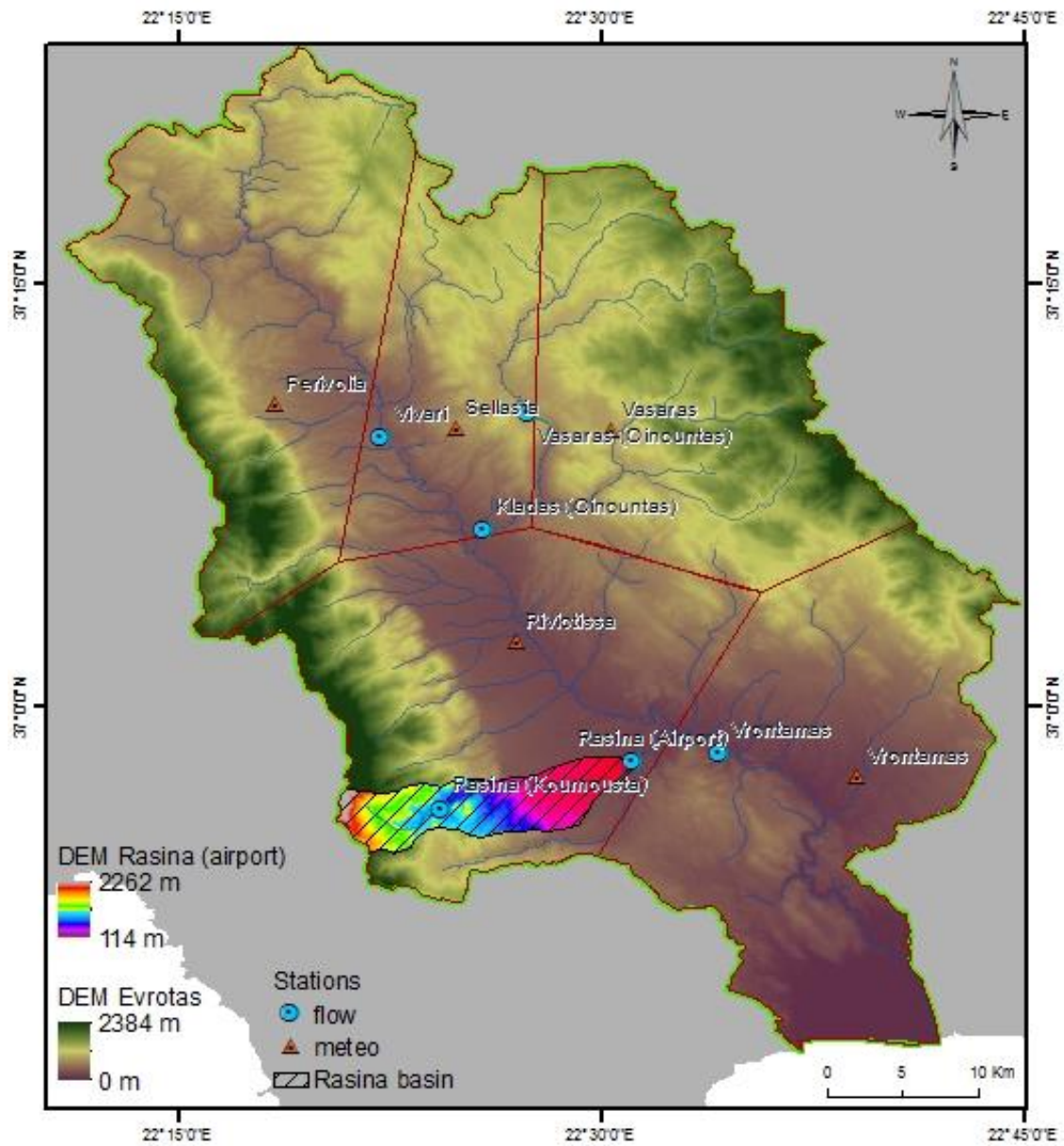
*Υπολεκάνες ποταμού Ευρώτα για την εφαρμογή του μοντέλου*

Προκειμένου να εφαρμοστεί το μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου σε ημερήσια βάση επιλέχθηκαν τρεις υπολεκάνες απορροής του ποταμού Ευρώτα: Οινούντας (Κλαδάς), Ρασίνα (Κουμουστά), Ρασίνα (Αεροδρόμιο), για τις οποίες παρέχονταν πλήρη δεδομένα ημερήσιων παροχών για το υδρολογικό έτος 2009-2010. Οι τρεις υπολεκάνες που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω στα Σχήματα 3.5-3.7. Επιπροσθέτως, επιλέχθηκε η υπολεκάνη του Βιβαρίου για την εφαρμογή του μοντέλου σε μηνιαία βάση (Σχήμα 3.8). Τα διαθέσιμα δεδομένα μηνιαίων παροχών για την υπολεκάνη αφορούν στην περίοδο 2005-2009.

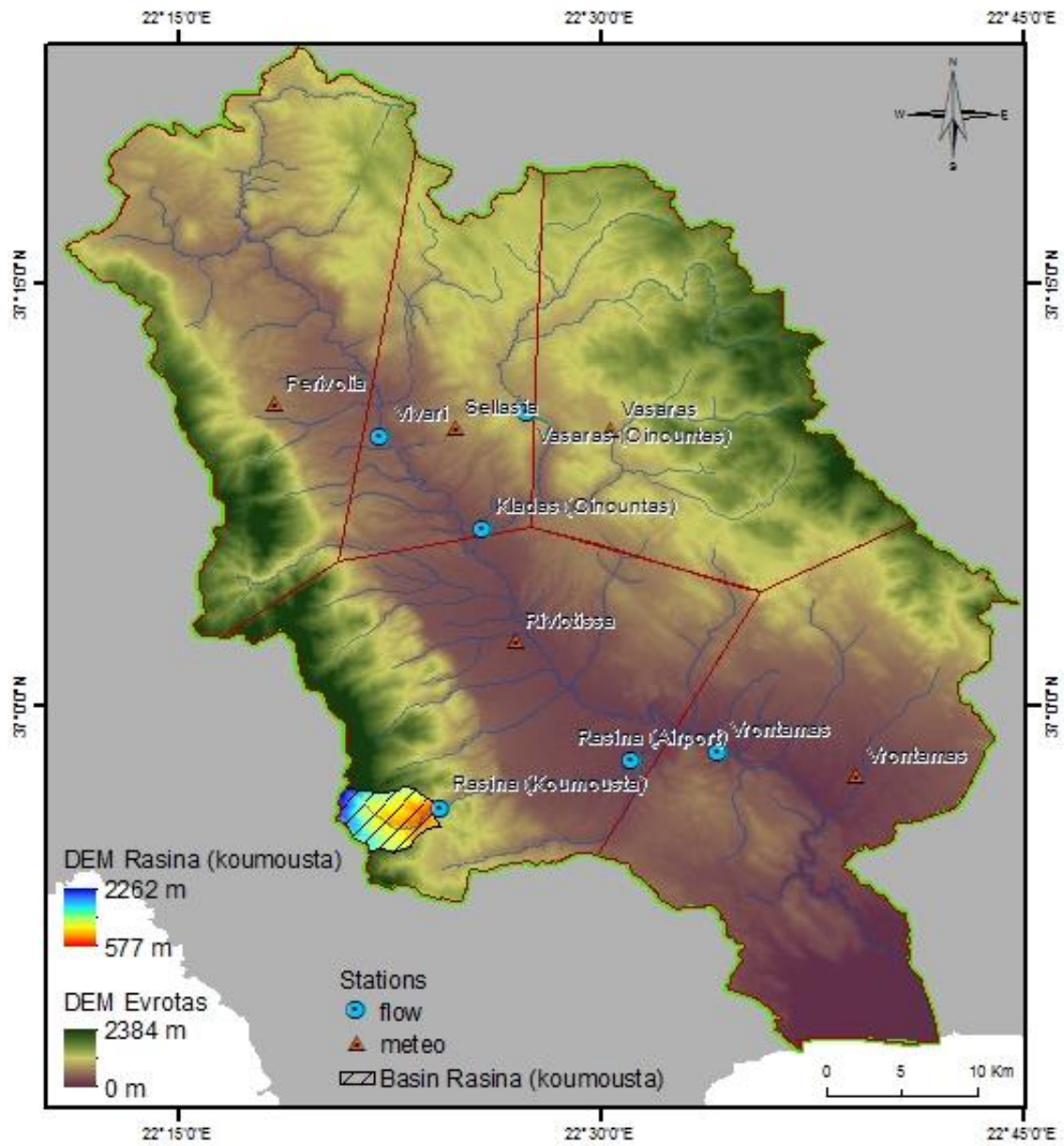
Τα δεδομένα των βροχοπτώσεων που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από τους βροχομετρικούς σταθμούς που εντάσσονται σε κάθε υπολεκάνη, λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές βαρύτητας από την εφαρμογή των πολυγώνων της μεθόδου Thiessen και της βροχοβαθμίδας, όπως αυτά περιγράφηκαν παραπάνω.



Σχήμα 3.5. Υπολεκάνη Οινόυντα (Κλαδάς)

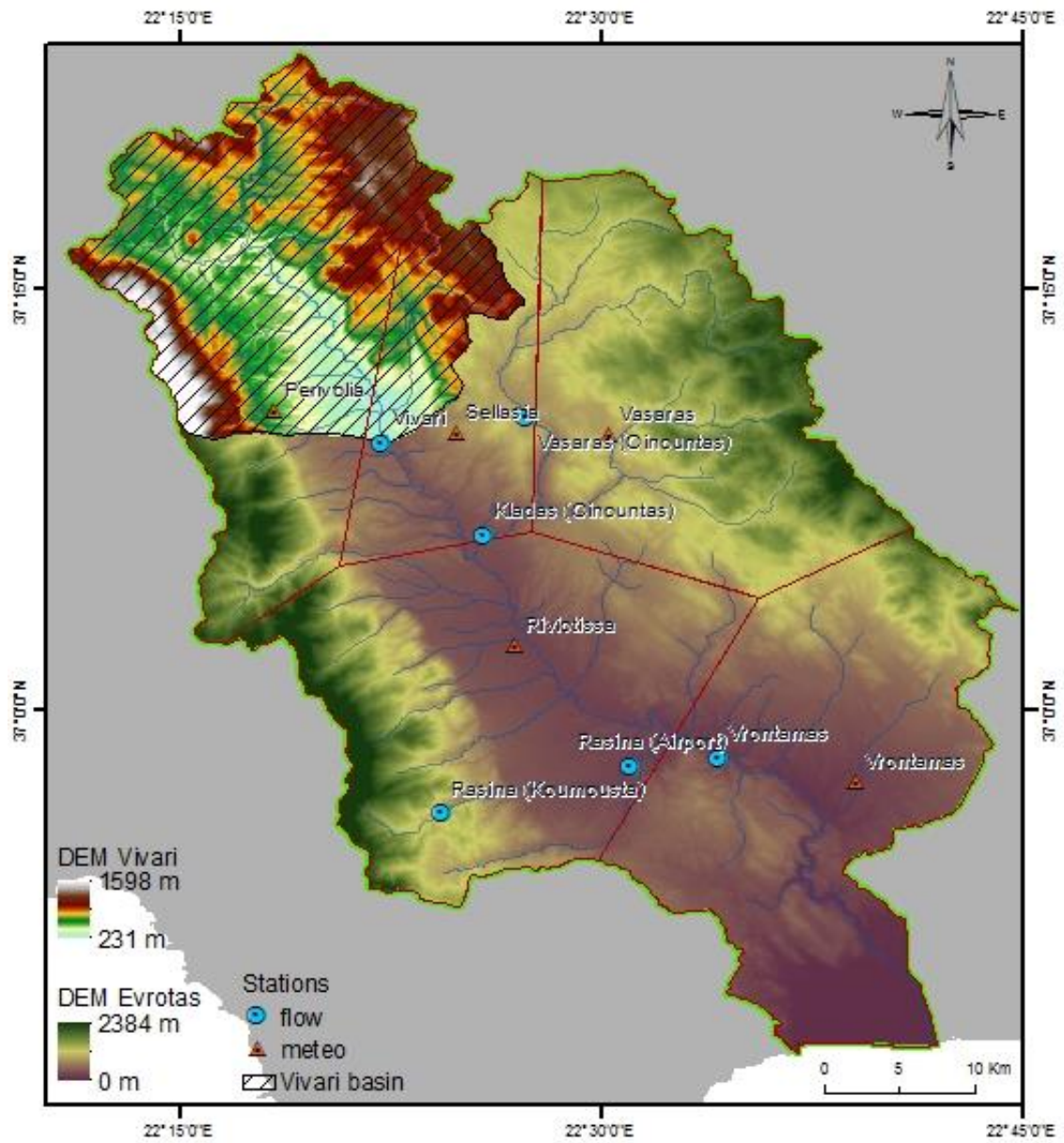


Σχήμα 3.6. Υπολεκάνη Ρασίνας (Αεροδρόμιο)



Σχήμα 3.7. Υπολεκάνη Ρασιάς (Κουμουστά)





Σχήμα 3.8. Υπολεκάνη Βιβαρίου

Σύμφωνα με τα πολύγωνα Thiessen (Χάρτης 3.3) η βροχοπτώση της υπολεκάνης του Οινούντα (Κλαδά) περιλαμβάνει τμήμα των βροχοπτώσεων από τους μετεωρολογικούς σταθμούς του Οινούντα (Βασαρά) και της Σελλασίας. Η τομή των υπολεκανών με τα πολύγωνα Thiessen στο περιβάλλον Arcmap GIS10 έδωσε τον υπολογισμό των βαρών Thiessen για κάθε σταθμό και με βάση τα βάρη αυτά υπολογίστηκε τελικά η χρονοσειρά της βροχοπτώσης για την υπολεκάνη. (Πίνακας 3.4). Σαν υψόμετρο Η χρησιμοποιήθηκε το μέσο υψόμετρο κάθε υπολεκάνης όπως προέκυψε από το GIS. Χρησιμοποιώντας το ψηφιακό τοπογραφικό ανάγλυφο (Digital Elevation Model – DEM), το θεματικό χάρτη των υπολεκανών και το εκτενές υδρολογικό μοντέλο, δημιουργήθηκε ένας νέος θεματικός χάρτης με το μέσο υψόμετρο ανά υπολεκάνη της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο συντελεστής αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της υπολεκάνης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5.

**Πίνακας 3.4:** Συντελεστές βάρους σταθμών μεθόδου Thiessen για την υπολεκάνη Οινούντα (Κλαδά).

<b>Υπολεκάνη απορροής Κλαδά</b>		
<b>ΣΤΑΘΜΟΣ</b>	<b>Εμβαδόν (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Wi</b>
<i>Σελλασία</i>	62,12	0,18
<i>Βασαράς</i>	290,03	0,82
<b>Σύνολο</b>	<b>352,16</b>	<b>1,00</b>

**Πίνακας 3.5:** Υπολογισμός συντελεστή αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της υπολεκάνης Οινούντα (Κλαδά).

<b>Μέσο Υψόμετρο (m)</b>	913,64
<b>Ε<sub>υπολεκάνης</sub> (km<sup>2</sup>)</b>	352,16
<b>Δh</b>	322,70
<b>Βροχοβαθμίδα (mm/100m)</b>	43,04
<b>Pt (mm)</b>	729,83
<b>Συντελεστής αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης</b>	1,24

Για τις δύο υπολεκάνες της Ρασίνας οι βροχοπτώσεις υπολογίστηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Ριβιώτισσας. Οι συντελεστές αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της κάθε υπολεκάνης φαίνονται στους Πίνακες 3.6-3.7 για το σταθμό στο Αεροδρόμιο και τα Κουμουστά αντίστοιχα.

Πίνακας 3.6: Υπολογισμός συντελεστή αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της υπολεκάνης Ρασίνα (Αεροδρόμιο)

Υπολεκάνη απορροής Ρασίνας (Αεροδρόμιο)	
Μέσο Υψόμετρο (m)	688,37
Ε <sub>ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ</sub> (km <sup>2</sup> )	51,20
Δh	530,37
Βροχοβαθμίδα (mm/100m)	43,04
Pt (mm)	386,27
Συντελεστής αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης	2,44

Πίνακας 3.7: Υπολογισμός συντελεστή αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της υπολεκάνης Ρασίνα (Κουμουστά)

Υπολεκάνη απορροής Ρασίνας (Κουμουστά)	
Μέσο Υψόμετρο (m)	1250,08
Ε <sub>ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ</sub> (km <sup>2</sup> )	16,63
Δh	1092,08
Βροχοβαθμίδα (mm/100m)	43,04
Pt (mm)	628,03
Συντελεστής αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης	3,97

Πίνακας 3.8: Συντελεστές βάρους σταθμών μεθόδου Thiessen για την υπολεκάνη Βιβαρίου

Υπολεκάνη απορροής Βιβάρι		
ΣΤΑΘΜΟΣ	Εμβαδόν (km <sup>2</sup> )	Wi
Σελλασία	71,91	0,19
Περιβόλια	299,57	0,81
Σύνολο	371,48	1,00

Πίνακας 3.9: Υπολογισμός συντελεστή αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της υπολεκάνης Βιβαρίου

Υπολεκάνη απορροής Ρασίνας (Κουμουστά)	
Μέσο Υψόμετρο (m)	647,81
Ε <sub>ΥΠΟΛΕΚΑΝΗΣ</sub> (km <sup>2</sup> )	647,81
Δh	134,97
Βροχοβαθμίδα (mm/100m)	43,04
Pt (mm)	570,93
Συντελεστής αναγωγής στο μέσο υψόμετρο της λεκάνης	1,11



Πολλαπλασιάζοντας με τους παραπάνω συντελεστές τις αρχικές τιμές προέκυψαν οι τελικές ημερήσιες βροχοπτώσεις που εισήχθησαν στο μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου .

### 3.4 Εξατμισοδιαπνοή

#### 3.4.1 Η μέθοδος Penmann-Monteith

##### *Υπολογισμός δυνητικής εξατμισοδιαπνοής*

Αναγκαία παράμετρο για την εκτέλεση του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου και τον υπολογισμό τον μηνιαίων απορροών, αποτελεί η εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής έγινε με χρήση της μεθόδου Penman – Monteith, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} \frac{Rn}{\lambda} + \frac{\gamma'}{\Delta + \gamma'} F(u)D$$

Όπου:

**E'**: η δυνητική εξατμισοδιαπνοή [kg/(m<sup>2</sup>d)]

**γ'**:  $\gamma' = (1 + 0.33u)\gamma$

η τροποποιημένη έκφραση του ψυχρομετρικού συντελεστή [hPa/°C], ώστε να λαμβάνει υπόψη την αντίσταση των στομάτων. Η ταχύτητα του ανέμου δίνεται σε [m/s].

**F(u)**:  $F(u) = \frac{90}{T+275} u$

η τροποποιημένη μορφή της συνάρτησης του ανέμου [kg/( hPa m<sup>2</sup>d)], με T σε [°C] και u πάλι σε [m/s].

**Δ**: η κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών [hPa/°C]

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T+237.3)^2}, \text{ όπου } e_s = 6.11e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}$$

**Rn**: η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας [(kJ/(m<sup>2</sup>d)]

$Rn = Sn - Ln$ , όπου:

$S_n$ : αλγεβρικό άθροισμα εισερχόμενης μείον ανακλώμενης μικροκυματικής ακτινοβολίας

$$S_n = (1 - r) * S_0 * \left( 0.29 * \cos\varphi + 0.55 * \frac{n}{N} \right) \text{ kJ/m}^2\text{day}$$

$L_n$ : καθαρή μικροκυματική ακτινοβολία

$$L_n = \sigma * T_c^4 * (0.34 - 0.044 * e^{0.5}) * (0.1 + 0.9 * \frac{n}{N}) \text{ kJ/m}^2\text{day}$$

$S_0$ : εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία [(kJ/(m<sup>2</sup>d))]

$n$ : πραγματική ηλιοφάνεια (hr)

$N$ : σχετική ηλιοφάνεια (hr)

$\lambda$ : η λανθάνουσα θερμότητας εξάτμισης [kJ/kg]

$$\lambda = 2501 - 2.361 * T$$

$D$ : το έλλειμα κορεσμού των υδρατμών [hPa]

$$D = e_s - e = e_s - U * e_s$$

Όπου:

$U$ : σχετική υγρασία

### 3.4.2 Εκτίμηση εξατμισοδιαπνοής

Όπως περιγράφεται παραπάνω η εφαρμογή της μεθόδου Penman –Monteith σε ημερήσιο χρονικό βήμα απαιτεί τα παρακάτω μετεωρολογικά δεδομένα:

- > χρονοσειρές θερμοκρασίας (σε ημερήσιο χρονικό βήμα)
- > ταχύτητα ανέμου
- > σχετική υγρασία
- > σχετική ηλιοφάνεια και ποσοστό ηλιοφάνειας

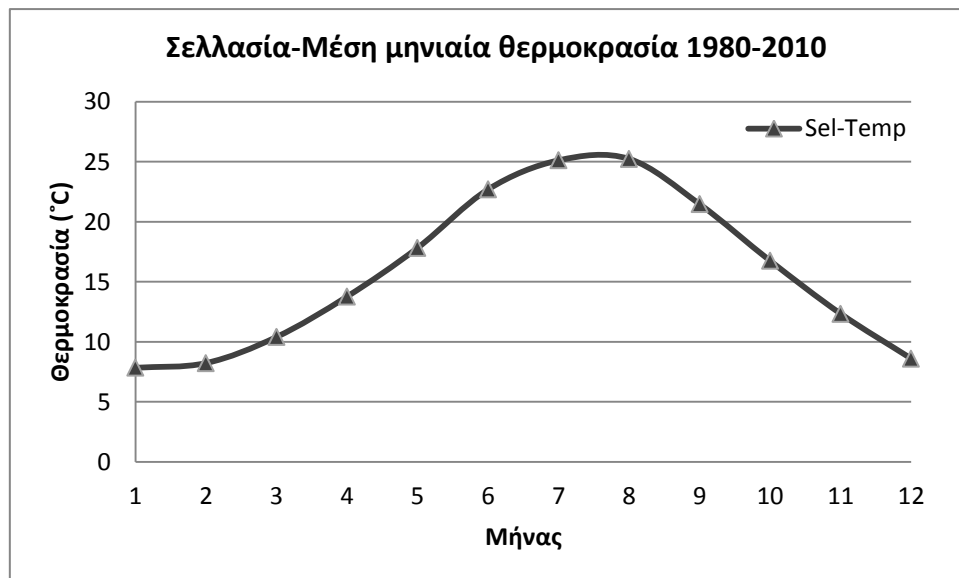
#### *Χρονοσειρές θερμοκρασίας*

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, εντός της λεκάνης του Κλαδά λειτουργούν 2 βροχομετρικοί σταθμοί, του Οινούντα (Βασαρά) και της Σελλασίας από τους οποίους και χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα για την ημερήσια κατακρίμνηση. Όμως, μόνο ο σταθμός της Σελλασίας λειτουργεί και ως μετεωρολογικός σε ημερήσια

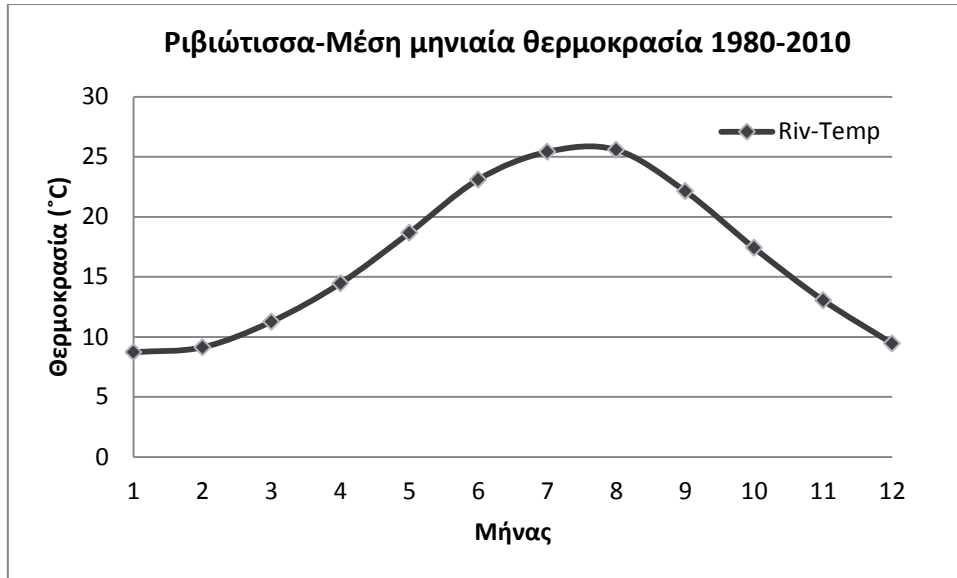
βάση και καταγράφει δεδομένα θερμοκρασίας. Επομένως, για την εν λόγω υπολεκάνη, καθώς και για την υπολεκάνη του Βιβαρίου χρησιμοποιήθηκαν οι σταθμοί μέτρησης μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας σε ημερήσια βάση από τον σταθμό της Σελλασίας.

Για τις άλλες δύο υπολεκάνες χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας από τον σταθμό της Ριβιώτισσας, που αποτελεί τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό ο οποίος καταγράφει δεδομένα θερμοκρασίας σε ημερήσια βάση. Ο σταθμός του Βρονταμά λειτουργεί μόνο ως βροχομετρικός.

Τα διαθέσιμα δεδομένα και για τους δύο μετεωρολογικούς σταθμούς αφορούν στην περίοδο 1965-2011. Στα Σχήματα 3.8-3.9 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες 30ετίας όπως καταγράφηκαν από τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Σελλασίας και της Ριβιώτισσας αντίστοιχα.



**Σχήμα 3.8:** Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες 1980-2010 από τις καταγραφές στο σταθμό της Σελλασίας



**Σχήμα 3.9:** Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες 1980-2010 από τις καταγραφές στο σταθμό της Ριβιώτισσας

*Ταχύτητα ανέμου- Σχετική Υγρασία*

Η πληροφορία για την ταχύτητα του ανέμου και τη σχετική υγρασία ελήφθησαν από το μετεωρολογικό σταθμό της Σπάρτης για την περίοδο 1/1/1974 έως 31/12/2004 (EMY). Τα δεδομένα παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες 3.10-3.11.

**Πίνακας 3.10** Μέση ταχύτητα του ανέμου [m/s], (EMY,1974-2004)

Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
1,7	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,0	2,0	1,7	1,5	1,6	1,5

**Πίνακας 3.11** Μέση σχετική υγρασία [%], (EMY,1974-2004)

Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
0,70	0,68	0,65	0,59	0,53	0,46	0,44	0,49	0,56	0,63	0,70	0,72

*Ηλιοφάνεια*

Ο σταθμός της Σπάρτης δεν παρείχε δεδομένα ηλιοφάνειας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μόνη διαθέσιμη χρονοσειρά ηλιοφάνειας n (hr) του μετεωρολογικού σταθμού της Καλαμάτας που βρίσκεται εκτός της λεκάνης απορροής, για την περίοδο 1977-2002 (EMY).

Πίνακας 3.12: μέσες μηνιαίες τιμές πραγματικής ηλιοφάνειας [hr], (ΕΜΥ, 1977-2002)

1977-2002	ΜΗΝΕΣ											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Avrg</b>	137,6	140,54	189,12	219,39	278,7	333,48	351,65	325,6	257,72	207,02	144,9	120,95
<b>Max</b>	210,6	195,2	253,6	290,3	349,1	379,2	393,1	362,6	293,3	258,6	195,5	152,2
<b>Min</b>	87,3	95	125,1	168	227,1	272,1	305,4	245,8	218	149,7	106,8	73,5

**N:** θεωρητικός αριθμός ωρών της ημέρας (ώρες από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου). Λαμβάνεται από τον πίνακα 3.13 συναρτήσει του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής και του μήνα που εξετάζεται.

Πίνακας 3.13: Μέσες μηνιαίες τιμές της αστρονομικής διάρκειας ημέρας N σε ώρες για γεωγραφικά πλάτη ( $\varphi$ ) 36° – 46° στο Βόρειο Ημισφαίριο

Μήνας	Γεωγραφικό Πλάτος $\varphi$ (°)						Καλαμάτα $\varphi$ (°)
	36	38	40	42	44	46	37
Ιαν	9,8	9,7	9,5	9,3	9,1	8,9	9,8
Φεβ	10,6	10,5	10,4	10,3	10,2	10,1	10,6
Μαρ	11,7	11,7	11,7	11,7	11,6	11,6	11,7
Απρ	12,9	13,0	13,0	13,1	13,2	13,3	13,0
Μαϊ	13,9	14,0	14,2	14,4	14,5	14,7	14,0
Ιουν	14,4	14,6	14,8	15,0	15,2	15,5	14,5
Ιουλ	14,2	14,4	14,5	14,7	14,9	15,2	14,3
Αυγ	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,9	13,5
Σεπ	12,2	12,2	12,3	12,3	12,3	12,3	12,2
Οκτ	11,1	11,0	10,9	10,8	10,7	10,7	11,1
Νοε	10,1	9,9	9,8	9,6	9,4	9,2	10,0
Δεκ	9,6	9,4	9,2	9,0	8,8	8,5	9,5

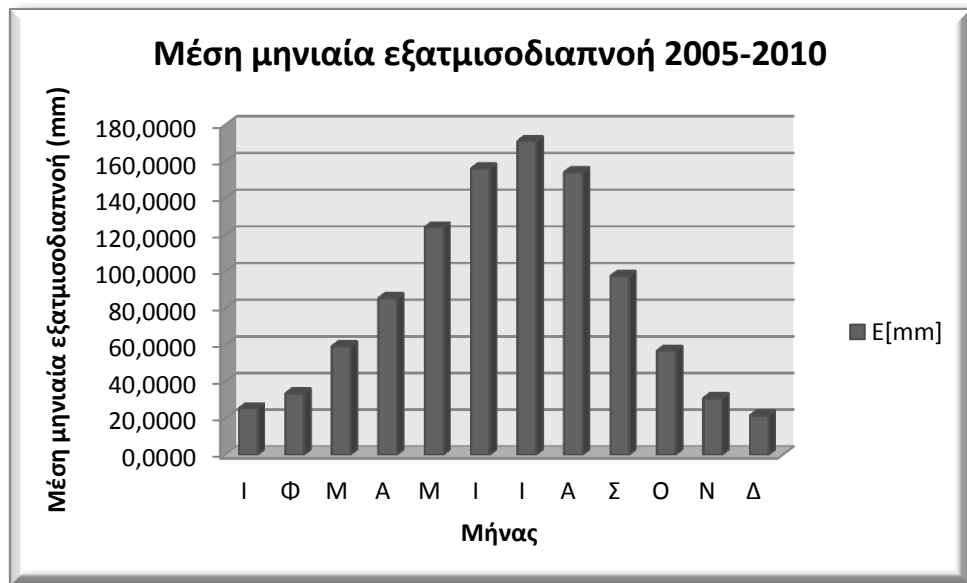
Η σχετική ηλιοφάνεια προέκυψε ως ο λόγος της πραγματικής η προς τη δυνητική ηλιοφάνεια ( $N^*$ αριθμό ημερών/μήνα) με βάση το μήνα και το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού της Καλαμάτας. Τα αποτελέσματα με τις μέσες μηνιαίες τιμές της σχετικής ηλιοφάνειας παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.14.

Πίνακας 3.14 Μέση μηνιαία σχετική ηλιοφάνεια

Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
0,46	0,46	0,52	0,56	0,64	0,77	0,79	0,78	0,70	0,60	0,48	0,41

Αφού προσδιορίστηκαν από τα παραπάνω δεδομένα όλες οι παράμετροι, εφαρμόστηκε η μέθοδος κατά Penmann-Monteith για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής σε ημερήσια βάση. Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι

μέσες μηνιαίες τιμές εξατμισοδιαπνοής, όπως προέκυψαν από τους υπολογισμούς, για την περίοδο 2005-2010.



Σχήμα 3.10: Μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή (mm) 2005-2010 κατά Penmann-Monteith

### 3.5 Υδρολογικά δεδομένα

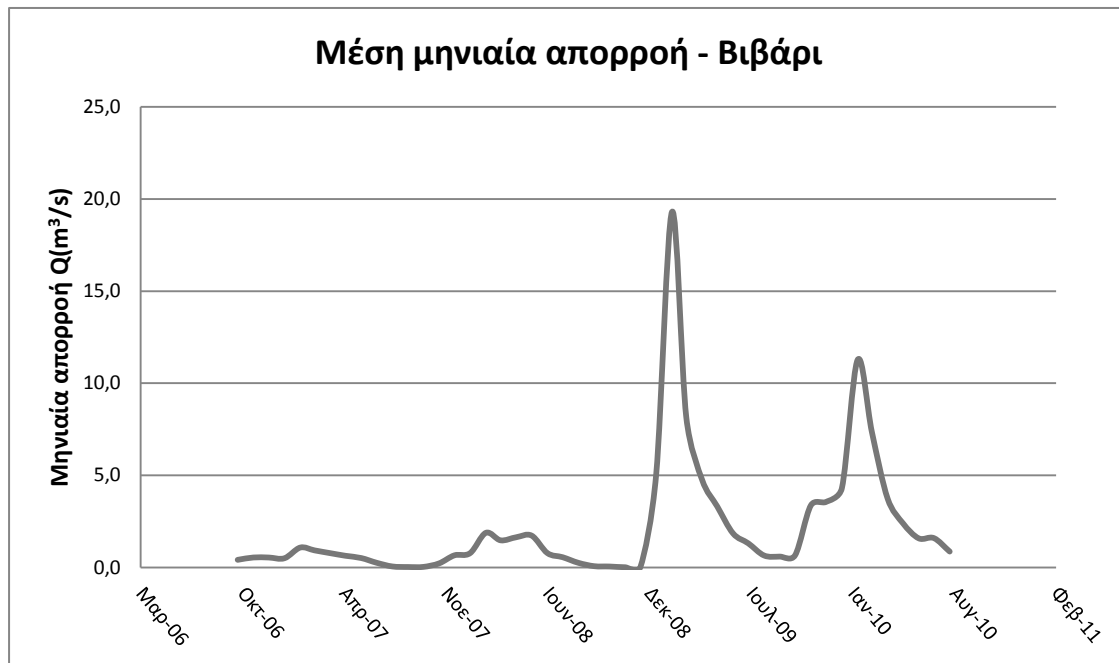
#### 3.5.1 Περιγραφή πρωτογενών δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε, στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα λειτουργούν έξι υδρομετρικοί σταθμοί (Σχήμα 3.1): Βρονταμάς, Βιβάρι, Οινούντας (Κλαδάς), Οινούντας (Βασαράς), Ρασίνα (Κουμουστά), Ρασίνα (Αεροδρόμιο). Ο σταθμός του Βρονταμά είναι ο παλαιότερος με την απορροή να μετρείται από το 1973 σε μηνιαία βάση, ενώ ο σταθμός του Κλαδά και οι δύο υδρομετρικοί σταθμοί της Ρασίνας τοποθετήθηκαν το 2008 και 2009 αντίστοιχα, παρέχοντας ημερήσια δεδομένα μέτρησης απορροής.

Στον Πίνακα 3.15 παρουσιάζονται τα κύρια φυσιογραφικά και χαρακτηριστικά ροής των υπολεκανών (Ourania Tzoraki et al., 2013).

Πίνακας 3.15: Κύρια φυσιογραφικά και χαρακτηριστικά ροής των υπολεκανών.

Όνομασία Σταθμού	Έκταση υπολεκάνης (km <sup>2</sup> )	Μέσο υψόμετρο (m)	Παροχές (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Διαθέσιμα μηνιαία δεδομένα απορροής
Βιβάρι	394.1	305	1.84 (±2.0)	1986–2011
Οινούντας (Βασαράς)	164.4	685	0.32 (±0.30)	1995–2011
Οινούντας (Κλαδάς)	349.8	211	0.31 (±0.31)	2008–2011
Ρασίνα (Κουμουστά)	28.5	954	0.58 (±0.47)	2009–2011
Ρασίνα (Αεροδρόμιο)	55.8	166	0.45 (±0.45)	2009–2011
Βρονταμάς	1348	181	3.62 (±4.23)	1973–2011



Σχήμα 3.11: Μέσες μηνιαίες παροχές στη θέση Βιβάρι για την περίοδο 2006-2010

Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται η σταδιακή μείωση της παροχής από τα τέλη της άνοιξης (Μάιος 2007) που στη συνέχεια μηδενίζεται απότομα (τέλη του Αυγούστου 2007). Από τα μέσα του Δεκέμβρη ως τα τέλη του Φεβρουαρίου του 2009 και 2010 σημειώθηκαν πλημμυρικές παροχές.

### 3.5.2 Επιλογή και επεξεργασία δεδομένων

Στην παρούσα εργασία, μελετάται η εφαρμογή του υδατικού ισοζυγίου σε ημερήσια βάση. Τα υδρολογικά δεδομένα σε ημερήσιο βήμα που ήταν διαθέσιμα αφορούσαν στην περίοδο 07/2009-12/2010 για τις θέσεις Οινούντας (Κλαδάς), Ρασίνα

(Κουμουστά), Ρασίνα (Αεροδρόμιο). Επομένως, οι χρονοσειρές παροχής που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στις θέσεις αυτές για το υδρολογικό έτος 2009-2010. Μελετήθηκε, ακόμη, η υπολεκάνη στην περιοχή του Βιβαρίου σε μηνιαίο χρονικό βήμα για την περίοδο 2006-2009 (Σχήμα 3.11).

Ο υπολογισμός της ημερήσιας παροχής βασίστηκε στις καταγραφές των ημερήσιων μετρήσεων ροής – υγρής διατομής που πραγματοποιεί η Δ/νση Έγγειων Βελτιώσεων, της Νομαρχίας Λακωνίας. Οι τιμές της ημερήσιας παροχής φανερώνουν τον πλημμυρικό χαρακτήρα του Ευρώτα. Τα Σχήματα 3.12-3.14 παρουσιάζουν τις ημερήσιες τιμές της παροχής στον Ευρώτα στις θέσεις Οινούντα (Κλάδα), Ρασίνας (Κουμουστά), Ρασίνας (Αεροδρόμιο) από τον Οκτώβριο του 2009 έως το Σεπτέμβριο του 2010.



Σχήμα 3.12: Ημερήσιες παροχές στην υπολεκάνη Κλαδά για το υδρολογικό έτος 2010





**Σχήμα 3.13:** Ημερήσιες παροχές στην υπολεκάνη Ρασίνα (Κουμουστά) για το υδρολογικό έτος 2010.



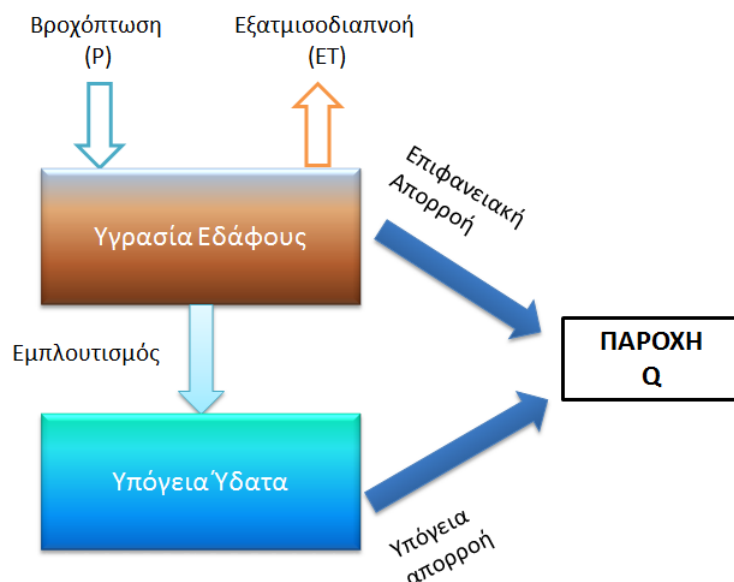
**Σχήμα 3.14:** Ημερήσιες παροχές στην υπολεκάνη Ρασίνα (Αεροδρόμιο) για το υδρολογικό έτος 2010.

## 4. Ανάπτυξη – Εφαρμογή Μοντέλου Υδατικού Ισοζυγίου

Τα μοντέλα υδατικού ισοζυγίου για λεκάνες απορροής έχουν γίνει ένα απαραίτητο εργαλείο για την αξιολόγηση, τη διαχείριση και τη χρήση των υδατικών πόρων. Παρέχουν μηχανισμούς για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής και την αξιολόγηση των επιπτώσεων των φυσικών ή ανθρωπογενών μεταβολών.

Στην υδρολογία τα μοντέλα αυτά είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την αξιολόγηση των παραδοχών και των θεωριών σχετικά με τις κυρίαρχες υδρολογικές διεργασίες σε μια λεκάνη. Με την πρόοδο στην απόκτηση και ακρίβεια των πρωτογενών δεδομένων καθώς και με τη συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας, σε συνδυασμό με τις ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις στη μοντελοποίηση, οδήγησαν στη δημιουργία μοντέλων που αντιπροσωπεύουν τις υδρολογικές εργασίες με περισσότερες λεπτομέρειες.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται να προσομοιωθεί η απορροή για διαφορετικές υπολεκάνες του Ευρώτα ώστε στη συνέχεια να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Προκειμένου, να επιτευχθεί ο στόχος αυτής της εργασίας εφαρμόστηκε το εννοιολογικό μοντέλο “abcd” (Thomas ,1981 - Thomas et al., 1983). Το μοντέλο εφαρμόζεται σε χρονοσειρές όπου η βροχόπτωση και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή χρησιμοποιούνται σαν εισροές και η απορροή ως έξοδος (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Προσομοίωση απορροής από το μοντέλο Thomas “abcd”

Η μελέτη επικεντρώνεται κυρίως στην «καλή προσαρμογή» μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των παρατηρήσεων, καθώς και την ευρωστία της επίδοσης του μοντέλου σε διαφορετικές τοποθεσίες στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα.

#### 4.1 Το Μοντέλο Υδατικού Ισοζυγίου παραμέτρων **a, b, c, d**

Το μοντέλο "ABCD" έχει τέσσερις παραμέτρους **a, b, c, και d**, που η καθεμία έχει μία ειδική φυσική ερμηνεία.

- **ά**: ελέγχει την ποσότητα της απορροής και της ανατροφοδότησης που εμφανίζεται όταν τα εδάφη είναι υπό-κορεσμένα.
- **β**: ελέγχει το επίπεδο κορεσμού των εδαφών.
- **γ**: καθορίζει το ποσοστό της αναπλήρωσης υπογείων υδάτων της επιφανειακής απορροής.
- **δ**: ελέγχει το ρυθμό της απαλλαγής των υπογείων υδάτων.
  - Η παράμετρος **a** ( $0 \leq a \leq 1$ ) αντανακλά την τάση της απορροής να συμβεί πριν το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο (Thomas et al., 1983).
  - Η παράμετρος **b** είναι το ανώτατο όριο για το ποσό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης της υγρασίας του εδάφους σε ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Προφανώς αυτή η παράμετρος εξαρτάται από την ικανότητα της λεκάνης να κρατήσει το νερό μέσα στον ανώτερο ορίζοντα του εδάφους.
  - Η παράμετρος **c** είναι ίση με το κλάσμα της ροής των υδατορευμάτων που προκύπτουν από την απορροή των υπόγειων υδάτων σε ένα δεδομένο χρονικό βήμα. Μακροπρόθεσμα ορίζεται ως ο δείκτης βασικής ροής (BFI), ένας δείκτης που χρησιμοποιείται συνήθως σε μελέτες που αναπτύσσουν σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και την απορροή των υπόγειων υδάτων σε ένα υδατόρευμα.
  - Το αντίστροφο της παραμέτρου **d** είναι ίσο με το μέσο χρόνο παραμονής των υπόγειων υδάτων. Το μοντέλο ορίζει δύο μεταβλητές κατάστασης:  $W_t$ , που ονομάζεται «διαθέσιμο νερό» και  $Y_t$ , που ονομάζεται «δυναμική εξατμισοδιαπνοή».

Έχοντας υπολογίσει όλα τα αναγκαία μεγέθη, επόμενο βήμα αποτέλεσε η εκτέλεση του μοντέλου υδατικού ισοζυγίου.

Σύμφωνα με αυτό, η εκτιμώμενη ημερήσια απορροή QE δίδεται από το άθροισμα:

$$QE(t) = DR(t) + QG(t)$$

Όπου:

**DR:** άμεση επιφανειακή απορροή

**QG:** υπόγεια απορροή ίση με:

$$QG(t) = dG(t)$$

Η παράμετρος του μοντέλου, d υποδηλώνει το ποσοστό συνεισφοράς του υπόγειου αποθηκευτικού νερού, G(t). Η υπόγεια αποθηκευτικότητα στο τέλος της περιόδου t είναι:

$$G(t) = (GR(t) + G(t - 1))/(d + 1)$$

Όπου:

**GR(t):** η τροφοδοσία του υπόγειου υδροφορέα, δίνεται από τη σχέση:

$$GR(t) = c(W(t) - Y(t))$$

**W(t) & Y(t):** οι δύο μεταβλητές κατάστασης που δίνονται αντίστοιχα από τις παρακάτω σχέσεις:

$$W(t) = P(t) + SN(t) + S(t - 1)$$

Όπου:

**P(t):** η βροχόπτωση κατά τη χρονική περίοδο t

**SN(t):** η χιονόπτωση κατά τη χρονική περίοδο t

**S(t-1):** η υγρασία του εδάφους κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα t-1

$$Y(t) = E(t) + S(t)$$

Όπου:

**E(t)**: η πραγματική εξατμισοδιαπνοή

**S(t)** :η υγρασία του εδάφους κατά τη χρονική περίοδο t

Η άμεση επιφανειακή απορροή είναι ίση με:

$$DR(t) = (1 - c)(W(t) - Y(t))$$

Οι δύο μεταβλητές κατάστασης συνδέονται με την παρακάτω μη γραμμική σχέση (Thomas, 1981):

$$Y(t) = (W(t) + b)/2a - (((W(t) + b)/2a)^2 - W(t)b/a)^{0.5}$$

Η υγρασία του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$S(t) = Y(t)exp(-PE(t)/b)$$

Όπου:

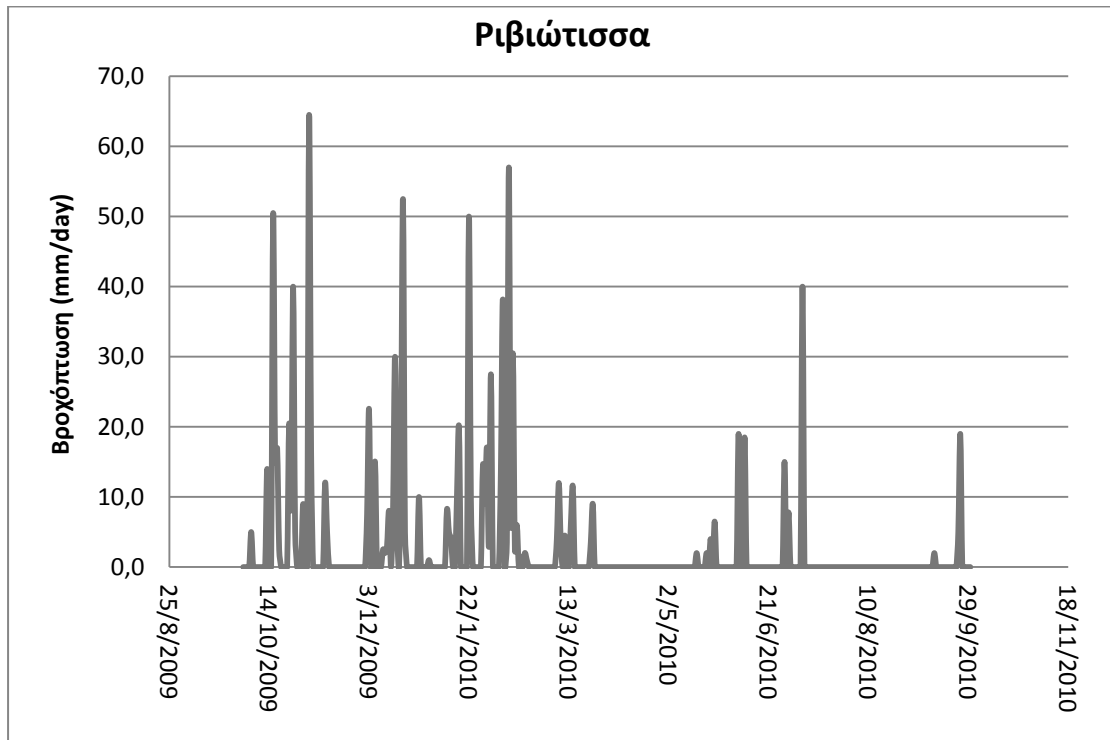
**PE(t)**: η δυναμική εξατμισοδιαπνοή

#### 4.2 Εφαρμογή μοντέλου στην περιοχή μελέτης

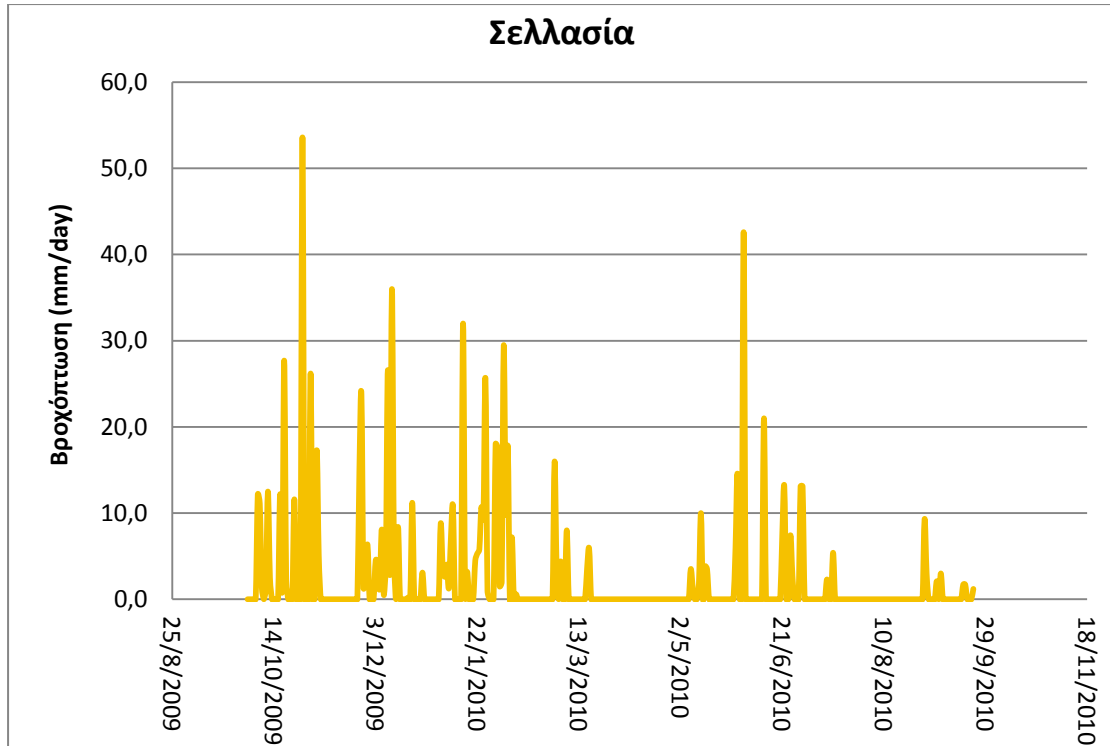
Ο υπολογισμός του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα περιλαμβάνει ως κύριες παραμέτρους τη βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή, και την παροχή του ποταμού. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, το μοντέλο εφαρμόστηκε για τις τρεις υπολεκάνες του Ευρώτα: Οινούντας (Κλαδάς), Ρασίνα (Αεροδρόμιο), Ρασίνα (Κουμουστά) σε ημερήσια βάση ενώ για την υπολεκάνη του Βιβαρίου εφαρμόστηκε σε μηνιαία βάση. Η προσομοίωση των υπολεκανών πραγματοποιήθηκε για το υδρολογικό έτος 2009-2010, που υπήρχαν διαθέσιμα ημερήσια δεδομένα απορροής, ενώ για το Βιβάρι οι μηνιαίες τιμές απορροής που ήταν διαθέσιμες αντιστοιχούν στην περίοδο 2005-2009. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος στο μοντέλο είναι οι κατακρημνίσεις και η εξατμισοδιαπνοή ενώ ως δεδομένα εξόδου εισήχθη η απορροή (mm) σε ημερήσια και μηνιαία βάση για τις τρεις υπολεκάνες και το Βιβάρι αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα πολύγωνα Thiessen η βροχόπτωση της υπολεκάνης του Κλαδά (Οινούντας) υπολογίζεται από το 18% της βροχόπτωσης του σταθμού της Σελλασίας και το 82% αυτής του σταθμού του Βασαρά. Για την υπολεκάνη του Βιβαρίου τα

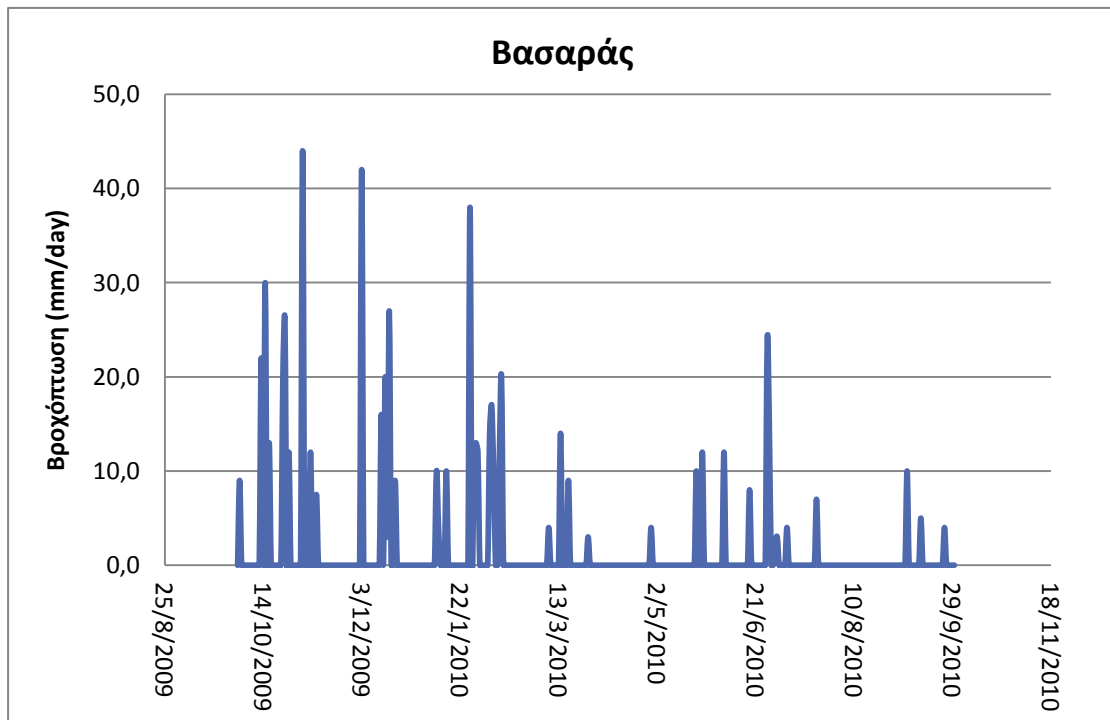
ποσοστά από τα πολύγωνα Thiessen προέκυψαν 81% και 19% των βροχοπτώσεων των σταθμών στη θέση Περιβόλια και Σελλασία αντίστοιχα. Οι 2 υπολεκάνες της Ρασίνας, Αεροδρόμιο και Κουμουστά, υπολογίζονται αποκλειστικά από τις βροχοπτώσεις του μετεωρολογικού σταθμού της Ριβιώτισσας. Στα Σχήματα 4.2-4.5 παρουσιάζονται οι ημερήσιες βροχοπτώσεις στους 4 μετεωρολογικούς σταθμούς για την περίοδο εφαρμογής του μοντέλου.



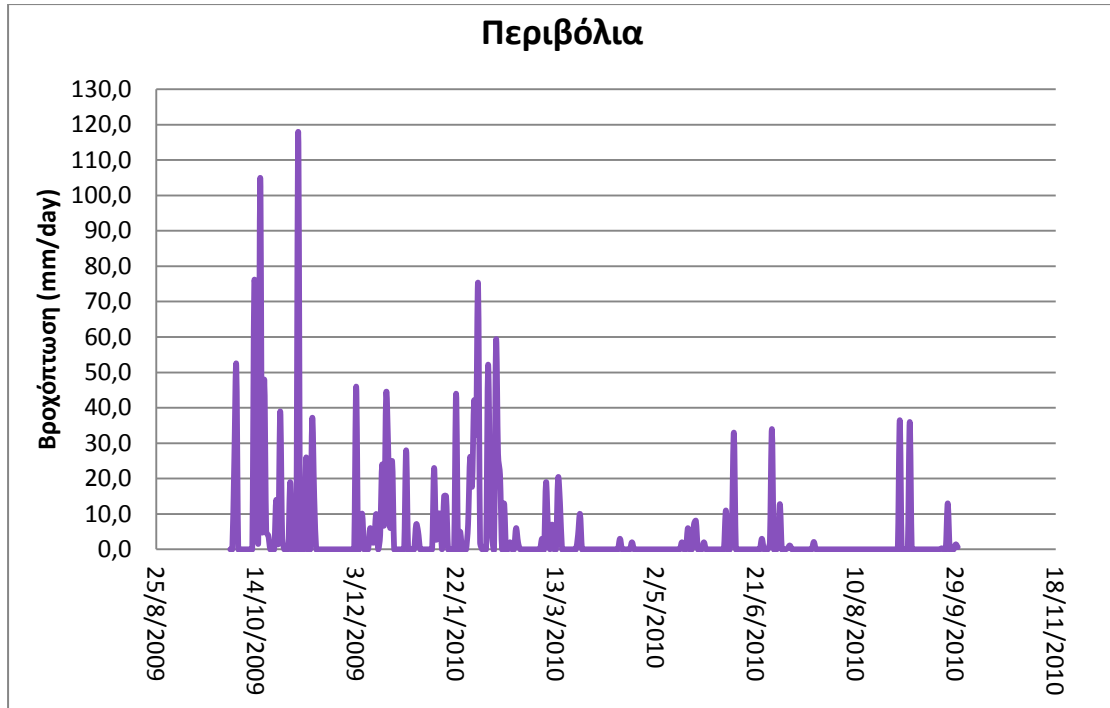
Σχήμα 4.2: Ημερήσια βροχόπτωση για το μετεωρολογικό σταθμό της Ριβιώτισσας.



Σχήμα 4.3: Ημερήσια βροχόπτωση για το μετεωρολογικό σταθμό της Σελλασίας.



Σχήμα 4.4: Ημερήσια βροχόπτωση για το μετεωρολογικό σταθμό του Βασαράς



Σχήμα 4.5: Ημερήσια βροχόπτωση για το μετεωρολογικό σταθμό του Βασαρά

Η εξαμυσοδιαπνοή για τις υπολεκάνες του Βιβαρίου και του Οινούντα (Κλαδά) υπολογίστηκε από τα δεδομένα θερμοκρασίας του σταθμού της Σελλασίας, ενώ των υπολεκανών της Ρασίνας υπολογίστηκε από τις καταγραφές του σταθμού της Ριβιώτισσας. Ο σταθμός Περιβολίων, δεν είχε αντίστοιχα δεδομένα, καθώς αποτελεί μόνο βροχομετρικό σταθμό.

### 4.3 Βαθμονόμηση

#### *Ορισμός βαθμονόμησης*

Βαθμονόμηση (calibration) είναι η συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, κατά τρόπο τέτοιο ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του μοντέλου να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις αντίστοιχες τιμές πεδίου (τιμές παρατήρησης). Προσομοιωμένες αποκρίσεις μπορεί να αναφέρονται σε παροχές νερού, εξαμυσοδιαπνοή, στερεοπαροχές και φορτία N και P. Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης του φυσικού συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών δεδομένων με τα προσομοιωμένα.



Στο θέμα της βαθμονόμησης οι παράμετροι που περιγράφουν τις εσωτερικές διεργασίες δεν είναι πάντοτε γνωστές, οπότε ζητείται βελτιστοποίηση της ίδιας της μαθηματικής δομής του μοντέλου με τρόπο ώστε η προσομοιωμένη απόκριση να προσεγγίζει καλύτερα την παρατηρημένη συμπεριφορά του υδρολογικού συστήματος. Γνωρίζοντας ότι σε ένα μοντέλο φυσικής βάσης όλες οι παράμετροι είναι θεωρητικά μετρήσιμες ιδιότητες του φυσικού συστήματος, μια τέτοια στρατηγική αναιρεί το χαρακτηρισμό του μοντέλου ως φυσικής βάσης, αφού η προσαρμογή έστω και μιας παραμέτρου κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης καθιστά την όλη προσέγγιση εννοιολογική (Ευστρατιάδης, 2008).

Όσο πιο πολύπλοκο είναι ένα μοντέλο, τόσο πιο δύσκολο είναι να γίνει προσομοίωση των διαφόρων φυσικών διεργασιών με υψηλό βαθμό βεβαιότητας. Αυτό γίνεται περισσότερο εφικτό όταν διατίθενται πολλά δεδομένα πεδίου, που όμως η συλλογή τους απαιτεί χρόνο, εξειδικευμένες γνώσεις και έχει σημαντικό κόστος. Επιπροσθέτως, η δυσκολία στη βαθμονόμηση μπορεί να οφείλεται σε εσωτερικές παραμέτρους του μοντέλου που στερούνται πλήρους φυσικής σημασίας και προσαρμόζονται εμπειρικά.

#### *Βαθμονόμηση μοντέλου*

Αφού έγινε η επιλογή και επεξεργασία όλων των δεδομένων, όπως περιγράφηκε παραπάνω, διατυπώθηκε το πρόβλημα ολικής βελτιστοποίησης. Αναλυτικότερα, προσδιορίστηκε η στοχική συνάρτηση και οι μεταβλητές ελέγχου και καθορίστηκαν τα εφικτά όρια των παραμέτρων με βάση τη φυσική σημασία τους, με σκοπό τη βελτιστοποίηση του μοντέλου. Το εύρος των τιμών που κυμαίνονται οι παράμετροι του μοντέλου παρουσιάζονται παρακάτω:

$$\Leftrightarrow 0 \leq \mathbf{a, c, d} \leq 1$$

$$\Leftrightarrow 0 \leq \mathbf{b} \leq 1500$$

$$\Leftrightarrow 40 \leq \mathbf{G_0} \leq 80$$

$$\Leftrightarrow 100 \leq \mathbf{S_0} \leq 350$$

Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου κριτήριο αποτέλεσε η αποτελεσματικότητα μεταξύ υπολογισμένης και μετρημένης χρονοσειράς απορροής. Προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητα πρόβλεψης του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η αντικειμενική συνάρτηση Nash-Sutcliffe (Nash. & Sutcliffe, 1970), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στις υδρολογικές προσομοιώσεις.

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs_i} - QE_{t_i})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs_i}})^2}$$

Για το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου που εφαρμόστηκε σε κάθε υπολεκάνη υπολογίστηκε ο συντελεστής EC, ο οποίος, σύμφωνα με την παραπάνω συνάρτηση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$EC = \frac{\sum_{t=1}^T (S_{obs_i} - S_i)}{\sum_{t=1}^T S_{obs_i}}$$

Όπου:

$$S_{obs_i} = (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs_i}})^2$$

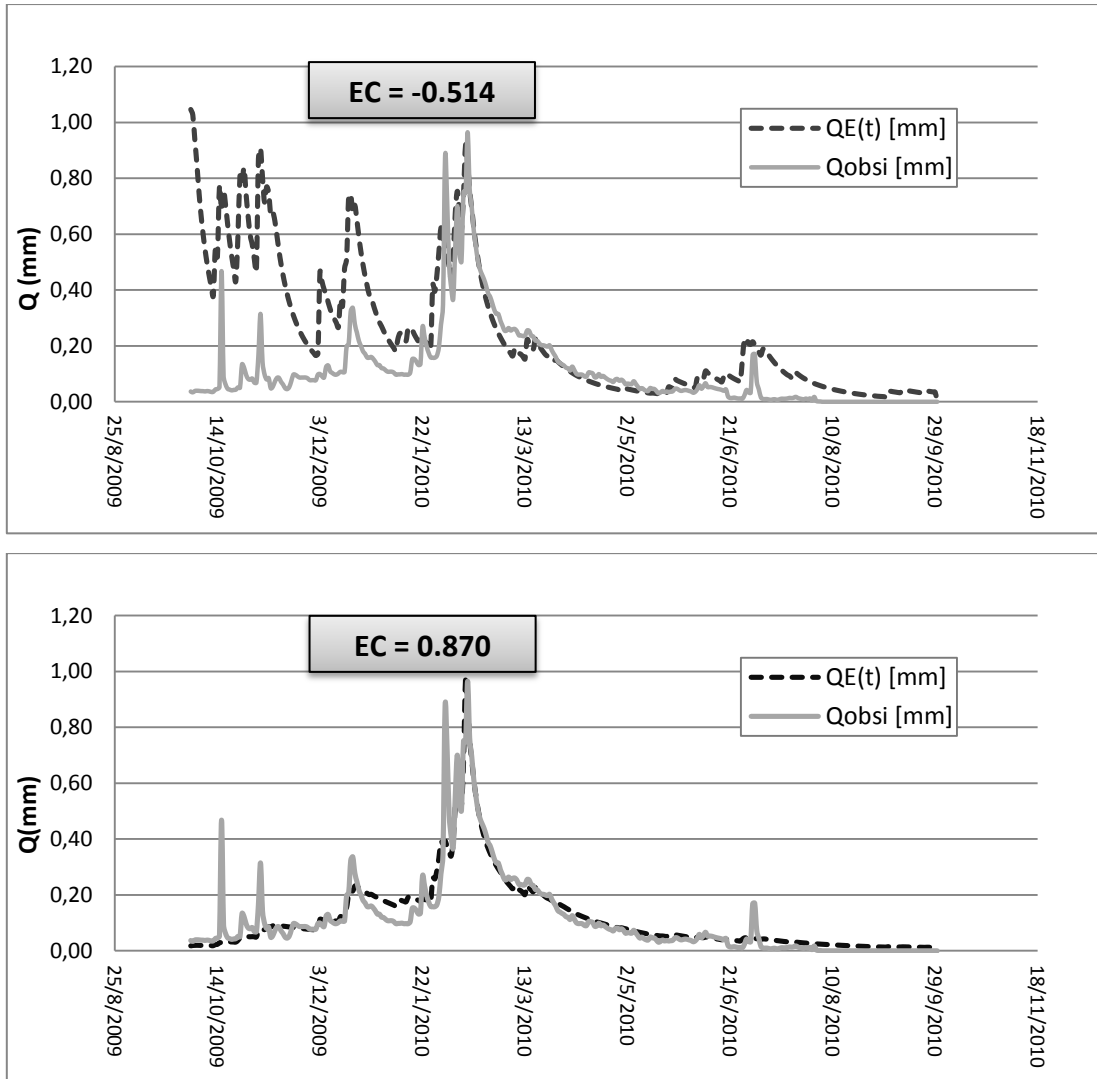
$$S_i = (Q_{obs_i} - QE_{t_i})^2$$

**Q<sub>obs</sub>**: οι παρατηρημένες απορροές

**QE<sub>t</sub>**: οι υπολογισμένες απορροές του μοντέλου

Ο συντελεστής απόδοσης EC κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $-\infty \sim 1$ . Η τιμή απόδοσης EC=1 αντιστοιχεί σε απόλυτη προσαρμογή του μοντέλου στις τιμές των παρατηρημένων παρατηρήσεων. Για EC=0 το μοντέλο ανταποκρίνεται στην προσομοίωση των παρατηρημένων δεδομένων όσο η μέση τιμή, ενώ για τιμές του EC<0 η μέση τιμή αντιπροσωπεύει καλύτερα την προσομοίωση των δεδομένων απ' ότι το μοντέλο. Με άλλα λόγια, όσο ο συντελεστής EC πλησιάζει την τιμή 1 τόσο αποτελεσματικότερα περιγράφει τις παρατηρημένες παρατηρήσεις.

Παρακάτω, στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται ενδεικτικά το διάγραμμα των ημερήσιων παροχών στην υπολεκάνη του Οινούντα (Κλαδά) πριν την εφαρμογή της βαθμονόμησης. Ο συντελεστής απόδοσης πριν τη βελτιστοποίηση υπολογίστηκε, αρχικά, ίσος με EC=-0,514. Όπως φαίνεται παρακάτω, οι τιμές του μοντέλου προσομοίωσης δεν πλησιάζουν τις παρατηρημένες τιμές κι επομένως δε αποτελούν ικανοποιητική αναπαραγωγή της μετρημένης απορροής.



Σχήμα 4.6: Ημερήσιες παροχές στη θέση Οινούντα (Κλαδά) πριν και μετά τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

## 5 Αποτελέσματα

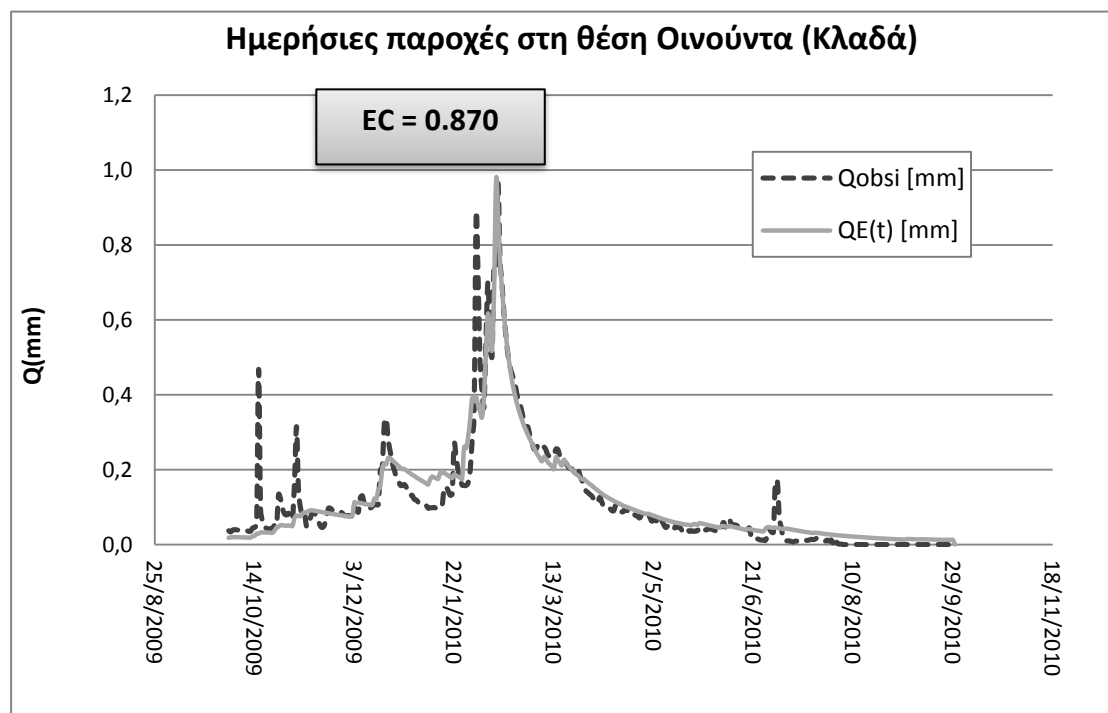
### 5.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Προκειμένου να προσομοιωθεί η απορροή για τις τέσσερις υπολεκάνες απορροής του Ευρώτα: Οινούντας (Κλαδάς), Ρασίνα (Αεροδρόμιο), Ρασίνα (Κουμουστά) σε ημερήσια βάση και Βιβάρι σε μηνιαία βάση, εφαρμόστηκε το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Thomas "a,b,c,d", όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα.

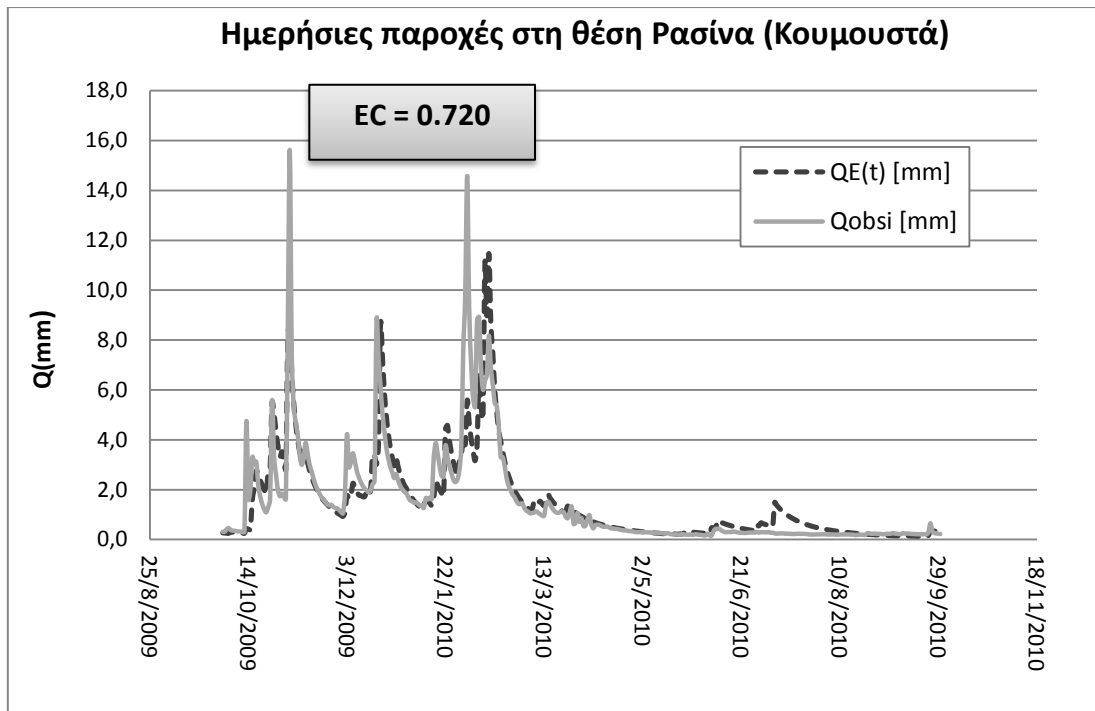
Για την καλή προσαρμογή του μοντέλου πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση και βελτιστοποιήθηκαν οι αντίστοιχες παράμετροι σε επίπεδο υπολεκάνης. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης θεωρήθηκαν αποδεκτά εφόσον εξασφαλίστηκαν τα εξής:

- ✓ Ικανοποιητική αναπαραγωγή των παρατηρημένων αποκρίσεων ( $EC > 0$ )
- ✓ Συνέπεια των βελτιστοποιημένων τιμών των παραμέτρων ως προς το φυσικό-εννοιολογικό τους υπόβαθρο

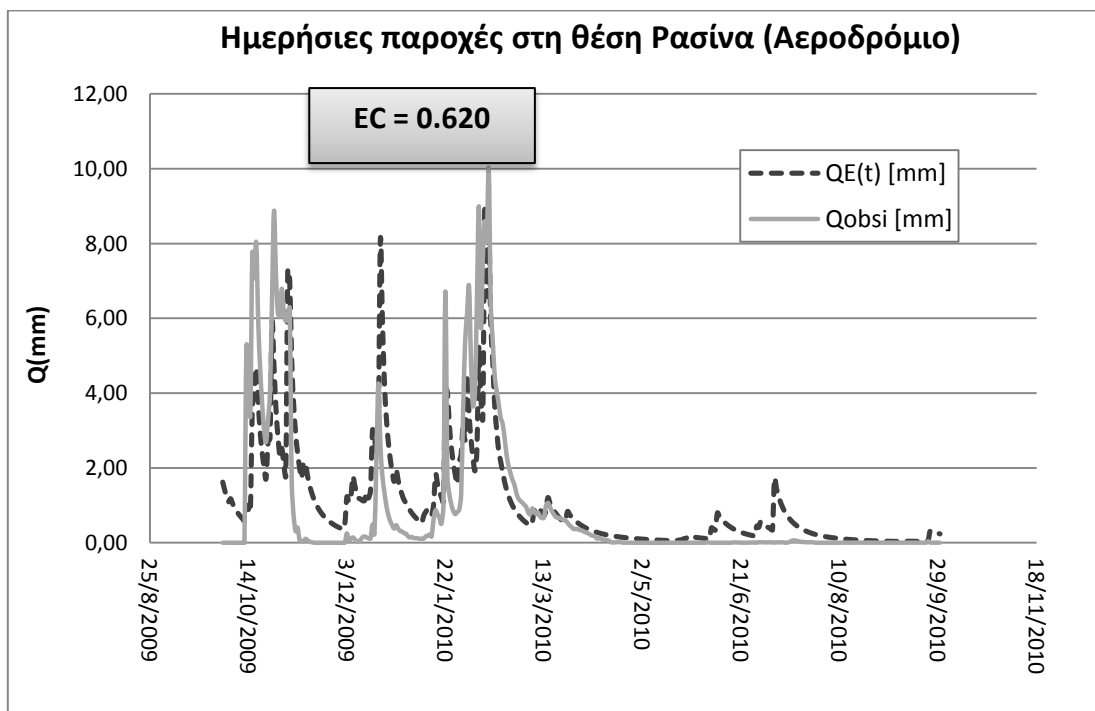
Ο βαθμός απόδοσης EC που φαίνεται στα Σχήματα 5.1- 5.4 εκφράζει πόσο αντιπροσωπευτικό είναι το μοντέλο για την προσομοίωση των απορροών της κάθε υπολεκάνης.



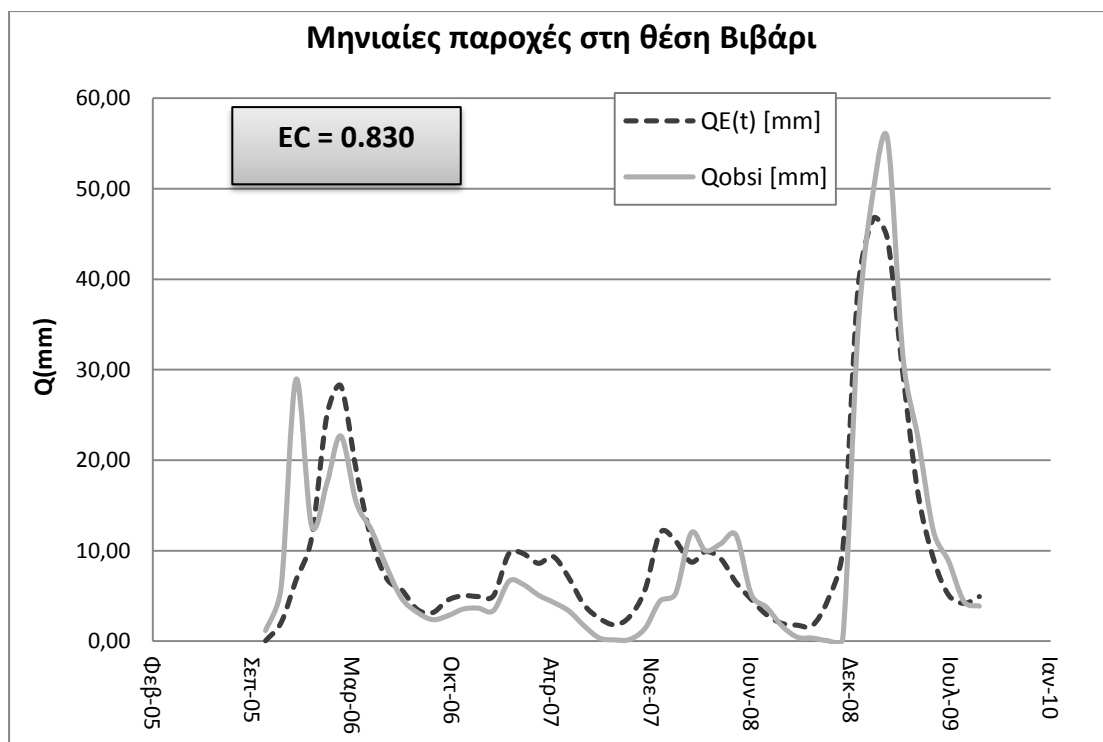
Σχήμα 5.1: Ημερήσιες παροχές στη θέση Οινούντα (Κλαδά) για την περίοδο 10/2009- 9/2010



**Σχήμα 5.2:** Ημερήσιες παροχές στη θέση Ρασίνα (Κουμουστά) για την περίοδο 10/2009-9/2010



**Σχήμα 5.3:** Ημερήσιες παροχές στη θέση Ρασίνα (Αεροδρόμιο) για την περίοδο 10/2009-9/2010



**Σχήμα 5.4:** Μηνιαίες παροχές στη θέση Βιβάρι για την περίοδο 10/2005- 9/2009

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Thomas, “a,b,c,d”. Πολύ ικανοποιητική προσαρμογή, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζει το μοντέλο προσομοίωσης για τις λεκάνες του Κλαδά και του Βιβαρίου για ανάλυση σε ημερήσια και σε μηνιαία βάση αντίστοιχα.

**Πίνακας 5.1:** Συντελεστές a,b,c,d,S<sub>0</sub>,G<sub>0</sub> για κάθε υπολεκάνη μετά από τη βαθμονόμηση του μοντέλου

Συντελεστής	Οινούντας (Κλαδάς)	Ρασίνα (Κουμουστά)	Ρασίνα (Αεροδρόμιο)	Βιβάρι
<b>a</b>	0,9995	0,9631	0,8852	0,9906
<b>b</b>	733,44	1100,00	503,91	1500,00
<b>c</b>	0,8567	0,8511	0,8378	0,7677
<b>d</b>	0	0	0	0
<b>S<sub>0</sub></b>	311,88	210,03	180,34	100,00
<b>G<sub>0</sub></b>	80,00	80,00	80,00	74,00
<b>EC</b>	<b>0,87</b>	<b>0,72</b>	<b>0,62</b>	<b>0,83</b>

## 5.2 Ανάλυση Ευαισθησίας παραμέτρων μοντέλου

Ύστερα από τη βελτιστοποίηση και τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $a$ ,  $b$ ,  $c$  και  $d$ , πραγματοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι ο προσδιορισμός της μεταβολής των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε πιθανή μεταβολή κάποιας εκ των παραμέτρων αυτού ( $a$ ,  $b$ ,  $c$  και  $d$ ), καθώς και του βαθμού με τον οποίο κάθε μεταβλητή τα επηρεάζει.

Η μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας που ακολουθήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι μία από τις απλούστερες και είναι η προσέγγισή της μέσω διακύμανσης μιας παραμέτρου εισόδου κάθε φορά (One at a time – OAT / one factor at a time – OFAT), και παρακολούθηση της επίδρασης την οποία προκαλεί στο τελικό αποτέλεσμα. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει:

- > Τη μετακίνηση μιας μεταβλητής εισόδου, εντός ορίων περιορισμού, διατηρώντας σταθερές όλες τις άλλες τιμές στην ονομαστική – αρχική τους τιμή.
- > Επιστρέφοντας την μεταβλητή αυτή στην αρχική της τιμή, και επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για άλλη μεταβλητή εισόδου με τον ίδιο τρόπο.

Παρά την απλότητα τις μεθόδου, αυτή η προσέγγιση δε διερευνά πλήρως το πεδίο τιμών των μεταβλητών εισόδου, δεδομένου ότι δεν λαμβάνει υπόψη την ταυτόχρονη μεταβολή των μεταβλητών μειώνοντας κατά ένα βαθμό τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος προσέγγισης OAT/OFAT δεν μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου (Czitrom, 1999) .

Σαν ενδεικτική της συμπεριφοράς του μοντέλου παράμετρος, θεωρείται η μέση τιμή των προσομοιωμένων απορροών. Σαν μεταβλητές παράμετροι οι τιμές των  $a$ ,  $b$ ,  $c$  και  $S(0)$  και όχι η  $d$  μιας και όπως φάνηκε κατά τη βαθμονόμηση, η τιμή του είναι μηδενική και άρα δεν υπεισέρχεται στους υπολογισμούς (ο υπόγειος υδροφορέας δηλαδή φάνηκε πως δε συντελεί στη συνολική απορροή της λεκάνης). Η μεταβλητή  $G(0)$  κατ' επέκταση δεν επηρεάζει το μοντέλο αφού η τιμή του  $d$  είναι μηδενική.

Ακολουθώντας τη διαδικασία αυτή και μεταβάλλοντας τις παραμέτρους  $a$ ,  $b$ ,  $c$  και  $S(0)$  του μοντέλου κατά διάφορα ποσοστά των αρχικών του τιμών σε επίπεδο υπολεκάνης, προκύπτουν τα παρακάτω Σχήματα 5.5-5.8. Κατά τον οριζόντιο άξονα των σχημάτων φαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή της εκάστοτε παραμέτρου, ενώ στον

κατακόρυφο άξονα παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τιμής των απορροών σύμφωνα με τον παρακάτω υπολογισμό:

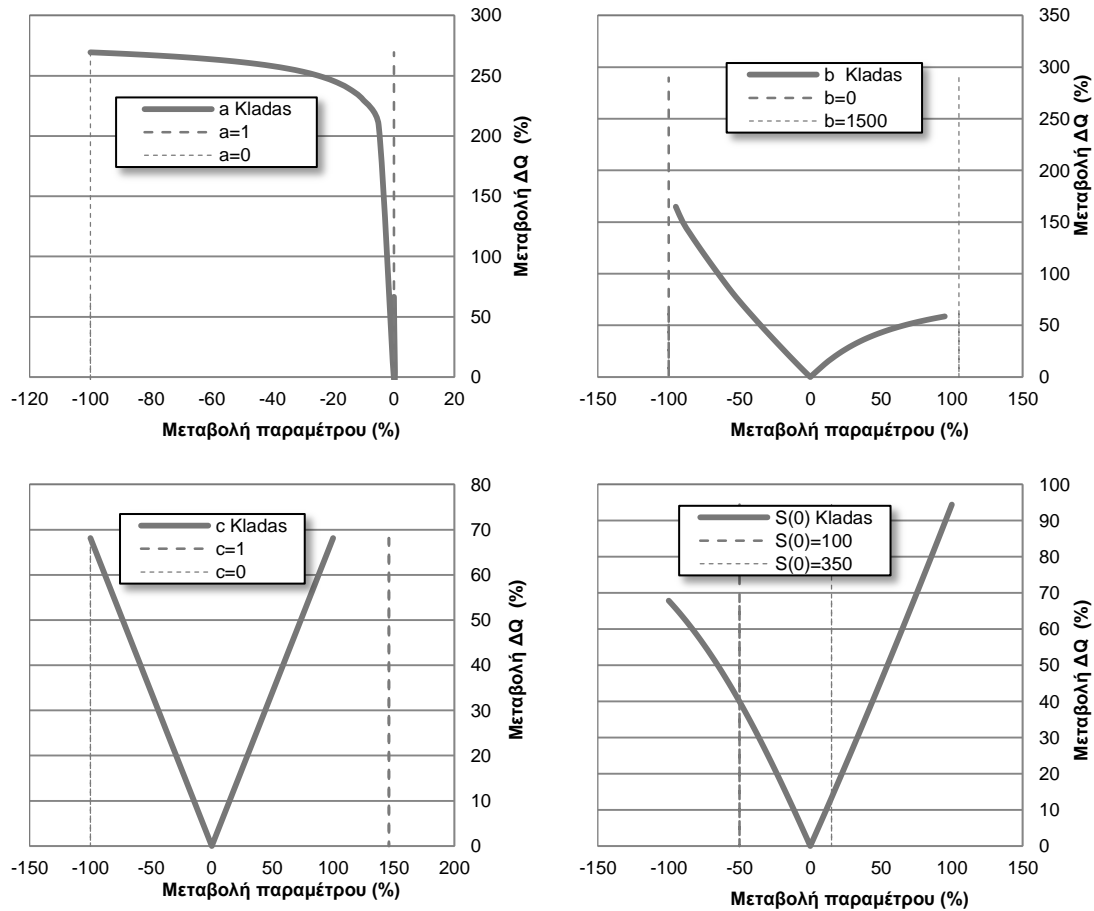
$$\Delta Q = \left| \frac{\sum Q_{cal} - \sum Q_{opt}}{\sum Q_{opt}} \right| \times 100\%$$

Όπου:

$\sum Q_{cal}$ : Άθροισμα των υπολογισμένων απορροών

$\sum Q_{opt}$ : Άθροισμα των υπολογισμένων απορροών για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων.

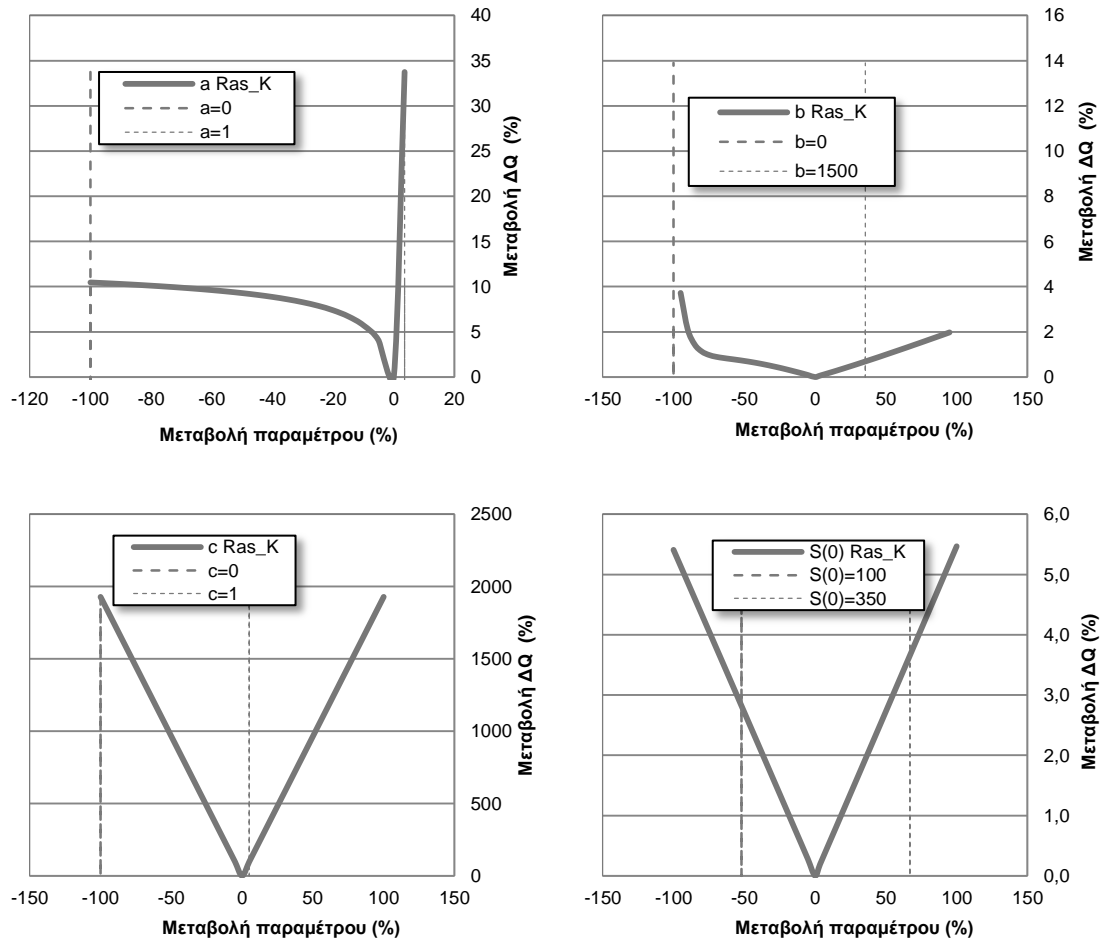




**Σχήμα 5.5:** Διάγραμμα συσχέτισης μέσης τιμής μοντέλου ως προς τη μεταβολή των παραμέτρων  $a, b, c, S(0)$  για την υπολεκάνη Κλαδά

Από το Σχήμα 5.5 είναι εμφανές πως τη μεγαλύτερη επίδραση στις παραχθείσες από το μοντέλο τιμές (συγκεκριμένα στη μέση τιμή αυτών) την έχει η μεταβλητή  $a$  και ακολουθεί η μεταβλητή  $b$ . Μικρότερη επίδραση στη μεταβολή της μέσης τιμής για την λεκάνη του Κλαδά έχει η παράμετρος  $c$ .

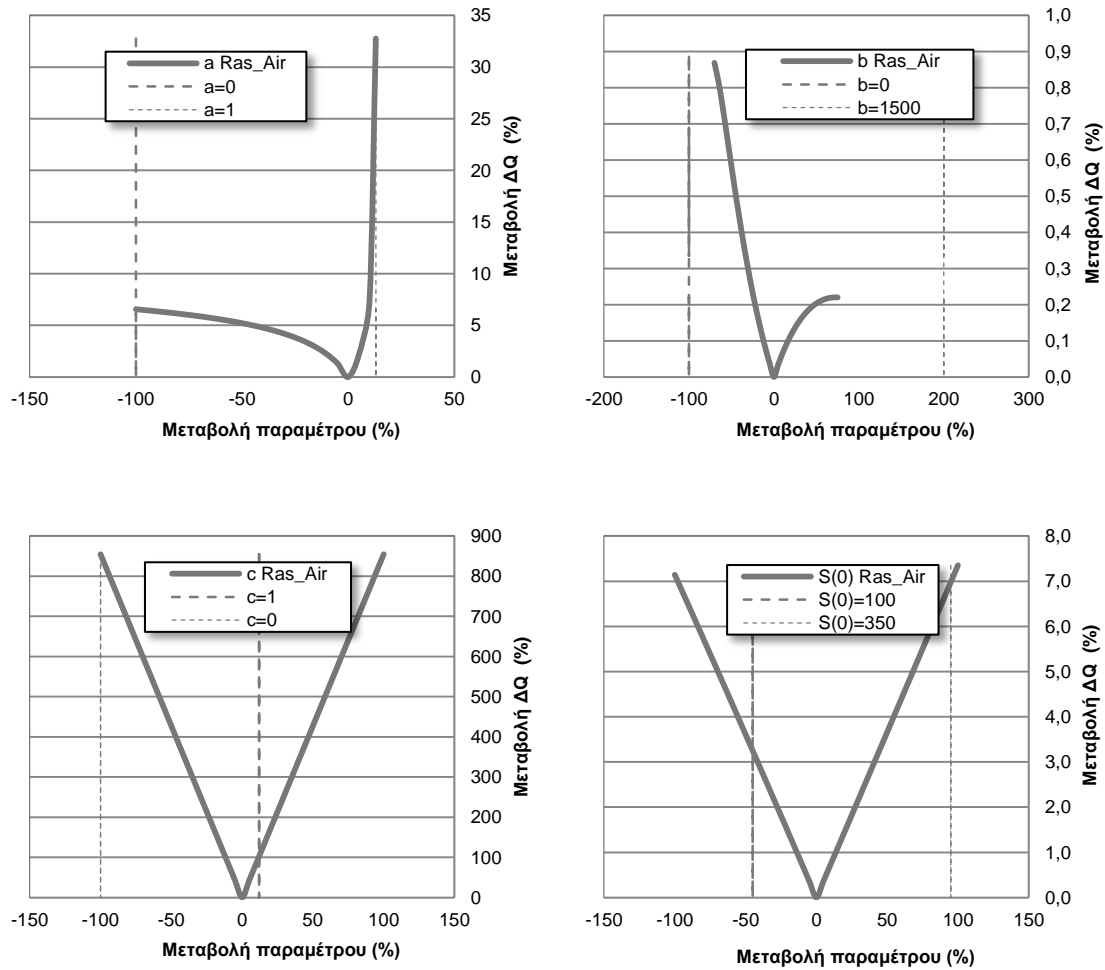
Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι αφενός η τάση της απορροής να εκδηλωθεί πριν τον πλήρη κορεσμό του εδάφους και αφετέρου το ποσό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης της υγρασίας του εδάφους, είναι οι πλέον καθοριστικές παράμετροι στην εν λόγω λεκάνη, ενώ φαίνεται πως η μεταβολή της απορροής των υπόγειων υδάτων (παράμετρος  $c$ ) στο συγκεκριμένο υδατόρευμα δεν επηρεάζει σημαντικά τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.



**Σχήμα 5.6:** Διάγραμμα συσχέτισης μέσης τιμής μοντέλου ως προς τη μεταβολή των παραμέτρων a,b,c, S(0) για την υπολεκάνη Ρασίνας (Κουμουστά)

Από το παραπάνω Σχήμα 5.6 παρατηρείται πως η μεταβλητή c αποτελεί την πιο «ευαίσθητη» παράμετρο του μοντέλου. Μόλις 5% αύξηση της c επιφέρει σχεδόν 100% αύξηση της μέσης τιμής. Ακολουθεί η παράμετρος a, η αύξηση της οποίας προκαλεί σημαντική μεταβολή σε σχέση με ενδεχόμενη μείωση της τιμής της. Δε φαίνεται να παρουσιάζει αξιόλογη μεταβολή το μοντέλο με τη διαφοροποίηση στην τιμή των άλλων δύο παραμέτρων b και S(0).

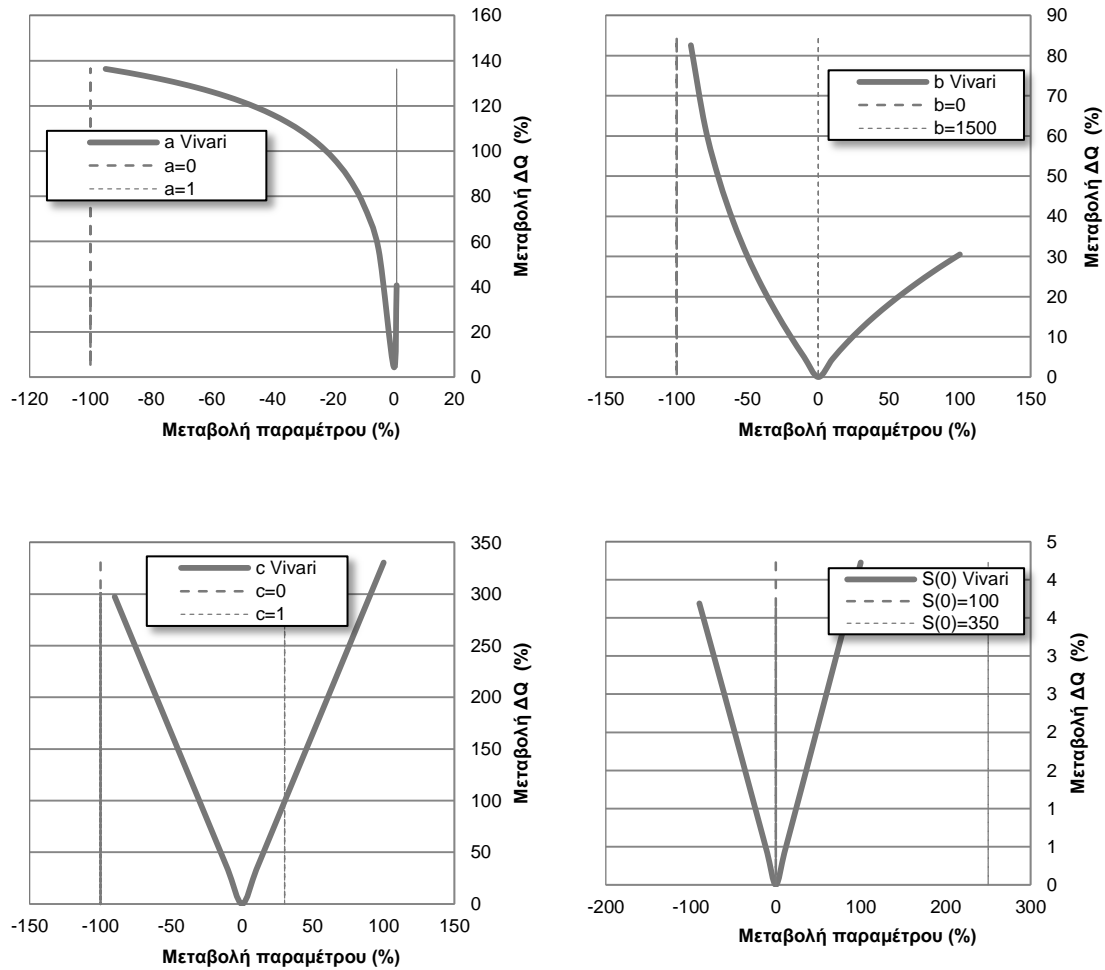
Σε αντίθεση με την λεκάνη του Κλαδά, στην υπολεκάνη της Ρασίνας (Κουμουστά) η βασικότερη παράμετρος που επηρεάζει το μοντέλο είναι το κλάσμα της ροής των υδατορευμάτων που προκύπτουν από την απορροή των υπόγειων υδάτων, ενώ, μεταβολή στο ανώτατο όριο της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης της υγρασίας του εδάφους δεν επιφέρει σημαντική μεταβολή.



**Σχήμα 5.7:** Διάγραμμα συσχέτισης μέσης τιμής μοντέλου ως προς τη μεταβολή των παραμέτρων  $a, b, c, S(0)$  για την υπολεκάνη Ρασίνας (Αεροδρόμιο)

Για τη λεκάνη της Ρασίνας στην περιοχή του Αεροδρομίου, όπως προκύπτει και από το Σχήμα 5.7, οι μεταβλητές που επηρεάζουν περισσότερο το μοντέλο είναι κατά κύριο λόγο η  $c$  και ακολούθως η  $a$ , οι ίδιες δηλαδή με την περιοχή των Κουμουστών. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού οι δύο υπολεκάνες έχουν το ίδιο γεωλογικό υπόβαθρο και κοινό υδατόρευμα.

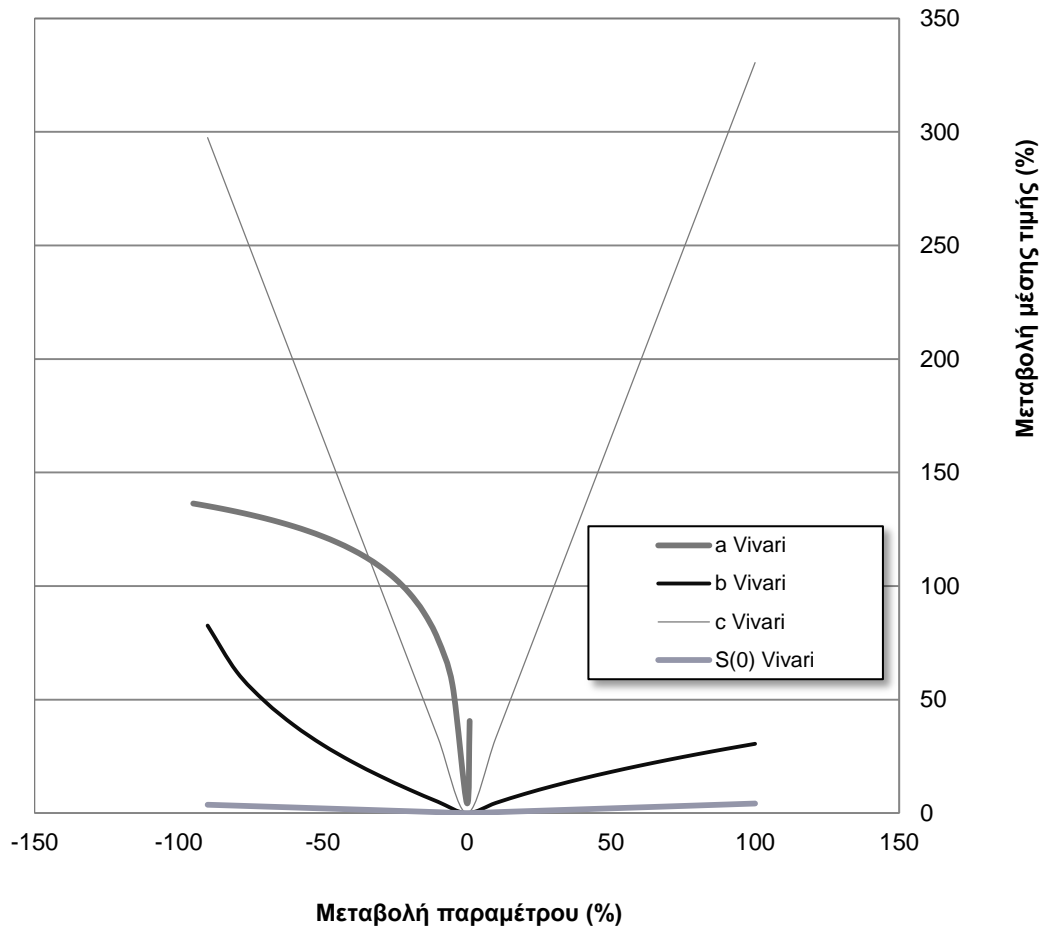
Επομένως, καθοριστικό λόγο για τη λεκάνη παίζει το ποσοστό της ροής που προκύπτει από τα απορροή των υπόγειων υδάτων. Όπως και προηγουμένως, μεταβολή στο ανώτατο όριο της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης της υγρασίας του εδάφους δεν διαφοροποιεί σημαντικά την εφαρμογή του μοντέλου στην εν λόγω περιοχή.



**Σχήμα 5.8:** Διάγραμμα συσχέτισης μέσης τιμής μοντέλου ως προς τη μεταβολή των παραμέτρων  $a, b, c, S(0)$  για την υπολεκάνη Βιβαρίου

Το μοντέλο για την υπολεκάνη του Βιβαρίου, ύστερα από την ανάλυση ευαισθησίας, προκύπτει ότι κρίνεται πιο «ευαίσθητο» για αύξηση ή μείωση (έως 30%) της τιμής της παραμέτρου  $a$ , ενώ για περαιτέρω μείωση πιο κρίσιμη παρουσιάζεται η παράμετρος  $c$  (Σχήμα 5.8). Λιγότερο φαίνεται να επηρεάζει στη συγκεκριμένη θέση η μεταβλητή  $b$ , ενώ μεταβολή της τιμής της  $S(0)$  δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου το μοντέλο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.9.

Πρακτικά, η τάση της απορροής να πραγματοποιείται χωρίς το έδαφος να είναι κορεσμένο και το μέγεθος της συνεισφοράς των υπόγειων υδάτων στην απορροή αποτελούν τις σημαντικότερες παραμέτρους που καθορίζουν το μοντέλο στην υπολεκάνη του Βιβαρίου.



**Σχήμα 5.9:** Διάγραμμα συσχέτισης μέσης τιμής μοντέλου ως προς τη μεταβολή των παραμέτρων a,b,c, S(0) για την υπολεκάνη Βιβαρίου

## 6 Σύνοψη - Συμπεράσματα – Μελλοντική Έρευνα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εξετάζεται η περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα, στην οποία και εφαρμόζεται ένα ημικατενεμημένο, εννοιολογικό, προσδιοριστικό υδρολογικό μοντέλο. Η εν λόγω λεκάνη απορροής βρίσκεται στο νοτιοανατολικό άκρο της Πελοποννήσου και έχει συνολική έκταση 1.739 τ.χλμ , ενώ το μεγαλύτερο μέρος της βρίσκεται μέσα στα όρια του Ν. Λακωνίας.

Η προσομοίωση της υδρολογικής συμπεριφοράς του Ευρώτα ποταμού απαιτεί χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων (βροχόπτωση, ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, θερμοκρασία σημείου δρόσου, ηλιακή ενέργεια, ταχύτητα ανέμου και ποσοστό ηλιοφάνειας) σε ημερήσιο χρονικό βήμα και παροχές του ποταμού. Επομένως, κρίσιμης και καθοριστικής σημασίας αποδεικνύεται η αξία της συνεχούς παρακολούθησης και συλλογής υδρολογικών δεδομένων στην περιοχή μελέτης, οι οποίες βοηθούν στην καλύτερη και πιο ασφαλή υδρολογική προσομοίωση του φυσικού συστήματος, ενώ παράλληλα μειώνουν τις αβεβαιότητες που καθορίζουν την υδρολογική συμπεριφορά του.

Συγκεκριμένα, έγινε ανάλυση και επεξεργασία σε τρεις υπολεκάνες απορροής του ποταμού Ευρώτα: Οινούντας (Κλαδάς), Ρασίνα (Κουμουστά), Ρασίνα (Αεροδρόμιο), για τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν τα διαθέσιμα δεδομένα ημερήσιων παροχών για το υδρολογικό έτος 2009-2010, καθώς και στην υπολεκάνη του Βιβαρίου σε μηνιαία βάση για την περίοδο 2005-2009.

Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου στα επιμέρους τμήματα της λεκάνης απορροής του Ευρώτα εφαρμόστηκε το μοντέλο Thomas “abcd”, κατά το οποίο τα δεδομένα των χρονοσειρών της βροχόπτωσης και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιούνται σαν εισροές και της απορροής ως έξοδος.

Στην περιοχή χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των 5 συνολικά βροχομετρικών σταθμών, από τα οποία δημιουργήθηκαν τα πολύγωνα του Thiessen στο περιβάλλον ArcGIS 10, με στόχο τη χρήση της αντίστοιχης μεθόδου για τον υπολογισμό του μέσου ύψους βροχής ανά υπολεκάνη. Για τις ανάγκες του μοντέλου, η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής έγινε με χρήση της μεθόδου Penman – Monteith.

Αφού έγινε η επιλογή και επεξεργασία όλων των δεδομένων, όπως περιγράφηκε παραπάνω, διατυπώθηκε το πρόβλημα ολικής βελτιστοποίησης. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του μοντέλου με παραμέτρους βελτιστοποίησης τις

τιμές των  $a, b, c, d$ ,  $S(0)$  και  $G(0)$ . Για τη βαθμονόμηση του μοντέλου κριτήριο αποτέλεσε η αποτελεσματικότητα μεταξύ υπολογισμένης και μετρημένης χρονοσειράς απορροής, η οποία αξιολογήθηκε μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης Nash-Sutcliffe (*Nash. & Sutcliffe, 1970*). Η βαθμονόμηση και των τεσσάρων μοντέλων για κάθε λεκάνη κρίθηκε ικανοποιητική αφού, ο παραπάνω δείκτης αποτελεσματικότητας προέκυψε μεγαλύτερος από 0.6, και μάλιστα, για τις λεκάνες του Κλαδά και του Βιβαρίου ξεπέρασε την τιμή 0.8.

Ύστερα από τη βελτιστοποίηση και τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $a, b, c$  και  $d$ , πραγματοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτει ότι:

- ✓ Για την λεκάνη του Κλαδά αφενός η τάση της απορροής να εκδηλωθεί πριν τον πλήρη κορεσμό του εδάφους (παράμετρος  $a$ ) και αφετέρου το ποσό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης της υγρασίας του εδάφους (παράμετρος  $b$ ), είναι οι πλέον καθοριστικές παράμετροι, ενώ η μεταβολή της απορροής των υπόγειων υδάτων (παράμετρος  $c$ ) δεν επηρεάζει σημαντικά τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.
- ✓ Σε αντίθεση με την λεκάνη του Κλαδά, στις δύο υπολεκάνες της Ρασίνας (Κουμουστά, Αεροδρόμιο) η βασικότερη παράμετρος που επηρεάζει το μοντέλο είναι το κλάσμα της ροής των υδατορευμάτων που προκύπτουν από την απορροή των υπόγειων υδάτων ( $c$ ), ενώ, μεταβολή στο ανώτατο όριο της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης της υγρασίας του εδάφους δεν επιφέρει σημαντική αλλαγή.
- ✓ Το μοντέλο για την υπολεκάνη του Βιβαρίου προκύπτει ότι κρίνεται πιο «ευαίσθητο» για αύξηση ή μείωση (έως 30%) της τιμής της παραμέτρου  $a$ , δηλαδή της τάσης να πραγματοποιείται απορροή χωρίς το έδαφος να είναι κορεσμένο, ενώ για περαιτέρω μείωση πιο κρίσιμη παρουσιάζεται η παράμετρος  $c$ , η οποία εκφράζει το μέγεθος της συνεισφοράς των υπόγειων υδάτων στην απορροή. Λιγότερο φαίνεται να επηρεάζει στη συγκεκριμένη θέση η πραγματική εξατμισοδιαπνοή και η αποθήκευση της υγρασίας του εδάφους (μεταβλητή  $b$ ), ενώ μεταβολή της τιμής της  $S(0)$  δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου το μοντέλο.

Συγκρίνοντας τις τελικές τιμές των μεταβλητών του μοντέλου προσομοίωσης της κάθε λεκάνης προκύπτουν κάποια συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Ευρώτα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα φαίνεται ότι:

- ✓ Τα επιμέρους υδρολογικά μοντέλα βελτιστοποιούνται για υψηλές τιμές της μεταβλητής  $a$ , δηλαδή κοντά στο ανώτατο όριο του πεδίου τιμών της ( $0 \leq a \leq 1$ ). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι καλύτερη προσαρμογή στις παρατηρημένες τιμές παροχών πραγματοποιείται όταν η απορροή επιτυγχάνει χωρίς απαραίτητα να έχει επέλθει κορεσμός του εδάφους.
- ✓ Για την περιοχή της Ρασίνας, παρ' ότι η υπολεκάνη των Κουμουστών αποτελεί τμήμα αυτής του Αεροδρομίου, η μεταβλητή  $a$  διαφέρει σε αποδεκτό βαθμό, όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της διαφοροποίησης στη μορφολογία του εδάφους και στη γεωλογία της περιοχής.
- ✓ .Για τις δύο λεκάνες απορροής της Ρασίνας, οι τιμές της παραμέτρου  $b$  παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση, γεγονός το οποίο μπορεί να οφείλεται στα ίδια αίτια, με ιδιαίτερα σημαντικό εξ αυτών τον προσανατολισμό των πρανών (περισσότερο Ν και Α), ένας παράγοντας που ελέγχει την ηλιακή ακτινοβολία και κατ' επέκταση το ποσό της εξατμισοδιαπνοής. Υπενθυμίζεται ότι η παράμετρος  $b$  υποδηλώνει το ποσοστό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και αποθήκευσης της υγρασίας του εδάφους. Σε ότι αφορά στις άλλες δύο λεκάνες, παρατηρείται ότι στη λεκάνη απορροής του Κλαδά, η οποία είναι η μεγαλύτερη σε έκταση υπολεκάνη μεταξύ εκείνων που μελετήθηκαν σε ημερήσιο βήμα και δεύτερη μεγαλύτερη στο σύνολο μετά το Βιβάρι, το βέλτιστο  $b$  προσεγγίζει τη μέση τιμή. ενώ στη λεκάνη του Βιβαρίου, η οποία μελετήθηκε σε μηνιαία βάση, βέλτιστη τιμή της παραμέτρου προκύπτει όταν η ικανότητα της λεκάνης να κρατήσει το νερό μέσα στον ανώτερο ορίζοντα του εδάφους γίνεται μέγιστη ( $b = 1500$ ), σύμφωνα με τους περιορισμούς που ορίστηκαν για το μοντέλο. Ένα γενικό συμπέρασμα για την παράμετρο  $b$  είναι πως παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση τόσο από λεκάνη σε λεκάνη, όσο και μεταξύ των μοντέλων με διαφορετικό χρονικό βήμα ανάλυσης (μηνιαίο, ημερήσιο).
- ✓ Σε ό,τι αφορά την παράμετρο  $c$ , η οποία είναι ίση με το κλάσμα της ροής των υδατορευμάτων που προκύπτουν από την απορροή των υπόγειων υδάτων σε ένα δεδομένο χρονικό βήμα, όπως αναμενόταν δεν παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των λεκανών που προσομοιώθηκαν σε ημερήσιο χρονικό βήμα. Ωστόσο, για τη λεκάνη του Βιβαρίου, όπου η ανάλυση



πραγματοποιήθηκε σε μηνιαίο βήμα, ο παράγοντας προκύπτει ελαφρώς μειωμένος · ένα χαρακτηριστικό που εν τέλει μπορεί και να αποτυπώνει καλύτερα το υδρογεωλογικό καθεστώς της περιοχής, καθώς στο μοντέλο ημερήσιας βάσης μια τέτοια παράμετρος είναι λογικό να μη μπορεί να προσομοιωθεί απόλυτα λόγω της χρονικής κλίμακας.

- ✓ Για την παράμετρο  $d$ , η οποία είναι αντίστροφη του μέσου χρόνου παραμονής των υπόγειων υδάτων, σε όλες τις περιπτώσεις το βέλτιστο προσεγγίζεται για μηδενική τιμή, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το ποσό του κατεισδύοντος νερού παραμένει στον υπόγειο υδροφόρα και δε συμβάλλει στην απορροή.
- ✓ Το ποσοστό συνεισφοράς του υπόγειου αποθηκευτικού νερού  $G(t)$  εξαρτάται από την παράμετρο  $d$  και λόγω του γεγονότος ότι αυτό ισούται με μηδέν, πρακτικά η υπόγεια αποθηκευτικότητα δε τροφοδοτεί την απορροή κι επομένως οποιαδήποτε μεταβολή στην τιμή της δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη βελτιστοποίηση.
- ✓ Τέλος, για την παράμετρο  $S_0$ , η οποία αντιπροσωπεύει την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους, όπως προκύπτει από την ανάλυση ευαισθησίας, συγκριτικά είναι η λιγότερο ευαίσθητη παράμετρος του μοντέλου. Πολύ μικρή επίδραση έχει η παράμετρος αυτή στην προσαρμογή του μοντέλου μόνο στη λεκάνη του Κλαδά. Ενδεικτικά, για αύξηση 50% του  $S_0$  ο δείκτης EC από 0,87 μειώνεται σε 0,559.

Με βάση τα συνολικά συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία, στη συνέχεια διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- ⇒ Αρχικά προτείνεται η μελέτη και των υπόλοιπων υπολεκανών του ποταμού Ευρώτα σε ημερήσιο βήμα και η σύγκριση των αποτελεσμάτων.
- ⇒ Στην παρούσα εργασία τα δεδομένα απορροής σε ημερήσιο βήμα ήταν περιορισμένης χρονικής περιόδου, με αποτέλεσμα το μοντέλο να εφαρμοστεί για ένα υδρολογικό έτος. Επομένως, η εφαρμογή του μοντέλου με μεγαλύτερο μέγεθος χρονοσειρών παρατηρημένων απορροών θα έδινε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.
- ⇒ Η εφαρμογή ενός πιο ολοκληρωμένου μοντέλου υδατικού ισοζυγίου που θα λαμβάνει υπ' όψιν και άλλες παραμέτρους. Ενδεικτικά, προτείνεται ένα μοντέλο που θα συμπεριλαμβάνει την παραμετροποίηση και υπολογισμό των χρήσεων γης, την υδραυλική κλίση, τη μεταφορά των φερτών και τις

απολήψεις, το οποίο θα προσομοίωνε πιο ρεαλιστικά το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης.

- ⇒ Τα όρια των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη αποτελούν εκτιμήσεις και παραδοχές. Η εισαγωγή περισσότερων πληροφοριών για τη μορφολογία του ποταμού θα επιτρέψει μια πιο εμπειριστατωμένη ανάλυση.
- ⇒ Η ανάλυση ευαισθησίας OAT/OFAT δε διερευνά πλήρως το πεδίο τιμών των μεταβλητών εισόδου, δεδομένου ότι δεν λαμβάνει υπόψη την ταυτόχρονη μεταβολή των μεταβλητών μειώνοντας κατά ένα βαθμό τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος προσέγγισης OAT/OFAT δεν μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου (Czitrom, 1999), κάτι το οποίο σε μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη.

## Αναφορές

- Andreadakis et al., 2008 E. Andreadakis, I. Fountoulis, I. Mariolakos, E. Kapourani, Hydrometeorological natural disasters and water resources management in Evrotas river basin (Peloponnesus, Greece), 3rd International Conference “AQUA 2008” on Water Science and Technology, 16–19 October 2008, Athens, Greece (2008)
- Antonakos, A. and Lambrakis, N., 2000. Hydrodynamic characteristics and nitrate propagation in Sparta aquifer. *Water Research*, 34 (16), 3977–3986.
- Cazemier, M., Querner, E. P., van Lanen, H. A. J., Gallart, F., Prat, N., Tzoraki, O., & Froebrich, J. (2011). Hydrological analysis of the Evrotas basin, Greece-Low flow characterization and scenario analysis (No. 2249, p. 92). Wageningen Universiteit-Alterra.
- Czitrom V. (1999). One-Factor-at-a-Time versus Designed Experiments *The American Statistician* Vol.53, Issue 2, May 1999, p. 126-131.
- Gamvroudis et al., 2011, C. Gamvroudis , N.P. Nikolaidis , O. Tzoraki, V. Papadoulakis, N. Karalemas, Water and sediment transport modeling of a large temporary river basin in Greece, *Science of the Total Environment* 508 (2015) 354–365
- Gamvroudis et al., 2011, C. Gamvroudis, N. Karalemas, V. Papadoulakis, O. Tzoraki, N.P. Nikolaidis, Hydrograph analysis of Inountas River Basin (Lakonia, Greece)
- Monteith J. L., 1965. "Evaporation and environment". *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19: 205–224. PMID 5321565. Obtained from *Forest Hydrology and Watershed Management – Hydrologie Forestiere et Amenagement des Bassins Hydrologiques (Proceedings of the Vancouver Symposium, August 1987, Actes du Co11oque de Vancouver, Aout 1987):IAHS-AISH Publ. no. 167, 1987. pp. 319–327.*
- Moriasi, D. N.; Arnold, J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner,R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007), "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations", *Transactions of the ASABE*, 50 (3), 885–900.

- N. Lambrakis, G. Stournaras, K. Katsanou (Eds.), *Advances in the Research of Aquatic Environment*, Springer, Berlin Heidelberg (2011), pp. 179–186
- Nash and Sutcliffe, 1970, J.E. Nash, J.V. Sutcliffe, River flow forecasting through conceptual models part I—a discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10 (1970), pp. 282–290
- Nikolaidis et al., 2013 N.P. Nikolaidis, F. Bouraoui, G. Bidoglio, Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed, *J. Hydrol.*, 477 (2013), pp. 129–138
- Salteli, A., Ratto, M. Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., Tarantola, S., *Global Sensitivity Analysis. The Primer*, John Wiley & Sons, 2008.
- Skoulikidis et al., 2011 N. Skoulikidis, L. Vardakas, I. Karaouzas, A. Economou, E. Dimitriou, S. Zogaris Assessing water stress in Mediterranean lotic systems: insights from an artificially intermittent river in Greece
- Tzoraki et al., 2011 O. Tzoraki, V. Papadoulakis, A. Christodoulou, E. Vozinaki, N. Karalemas, C. Gamvroudis, N.P. Nikolaidis, Hydrologic modelling of a complex hydrogeologic basin: Evrotas River Basin
- Tzoraki O., Cooper D., Kjeldsen T., Nikolaidis N. P., Gamvroudis C., Froebrich, J., ... & Karalemas, N. (2013). "Flood generation and classification of a semi-arid intermittent flow watershed: Evrotas river. *International journal of river basin management*, 11(1), 77-92".
- Αντωνάκος Α, 1997, Ρύπανση και μόλυνση του υπόγειου υδροφόρου της ευρύτερης περιοχής Σπάρτης από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Γεωλογίας, ΜΔΕ Γεωεπιστήμες & Περιβάλλον1, Πάτρα 1997.
- Ε.Μ.Υ Κλιματολογικά στοιχεία από την Ε.Μ.Υ (Μετεωρολογικοί σταθμοί Σπάρτης και Καλαμάτας)
- Νικολαΐδης Ν., Ν. Σκουλικίδης, Β. Παπαδουλάκης, Κ. Τσακίρης, & Ν. Καλογεράκης, 2009. Διαχειριστικά Σχέδια Πιλοτικής Αγροτικής Λεκάνης Ευρώτα Ποταμού Τεχνική έκθεση 134 σ. Στην Έκδοση: Νικολαΐδης Ν., Ν. Καλογεράκης, Ν. Σκουλικίδης, Κ. Τσακίρης, 2005-2009. Τεχνολογίες φιλικές

προς το περιβάλλον για αγροτική ανάπτυξη. Πρόγραμμα Life-περιβάλλον, LIFE05ENV/Gr/000245 EE (EnviFriendly)

- Νικολαΐδης Ν., Ν. Σκουλικίδης, Κ. Τσακίρης, & Ν. Καλογεράκης, 2006. Προκαταρκτικό Σχέδιο Διαχείρισης της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Ευρώτα και της Παράκτιας Ζώνης . Τεχνική έκθεση 242σ. + Παράρτημα 79σ. Στην Έκδοση: Νικολαΐδης Ν., Ν. Καλογεράκης, Ν. Σκουλικίδης, Κ. Τσακίρης, 2005-2009. Τεχνολογίες φιλικές προς το περιβάλλον για αγροτική ανάπτυξη. Πρόγραμμα Life-περιβάλλον, LIFE05ENV/Gr/000245 EE (EnviFriendly).
- Σκουλικίδης Ν. (επιμέλεια έκδοσης), Α. Οικονόμου, Ι. Καραούζας, Λ. Βαρδάκας, Κ. Γκρίτζαλης , Σ. Ζόγκαρης , Η . Δημητρίου και Βασίλειος Τάχος (2008). Υδρολογική και βιογεωχημική παρακολούθηση στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα. Τελική Τεχνική Έκθεση 1, ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. LIFE-ENVIRONMENT: LIFE05 ENV/GR/000245 «ENVIRONMENTAL FRIENDLY TECHNOLOGIES FOR RURAL DEVELOPMENT.