



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

«ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ SWAT ΚΑΙ LISFLOOD ΣΤΟΝ
ΑΝΩ ΡΟΥ ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ»

Λάμπρου Στέφανος

Επιβλέπων: Ε. Μπαλάς, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2021

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Extended Abstract.....	i
Introduction.....	i
Study Area and Data Used.....	i
Study area.....	i
Data used.....	ii
Methodology.....	iii
Description of the models.....	iii
Watershed modeling.....	iv
Model calibration and validation.....	viii
Results.....	ix
Conclusions.....	xiv
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Υδρολογικός Κύκλος.....	1
1.2 Μοντέλα βροχής – απορροής.....	3
1.3 Υδρολογική προσομοίωση.....	4
2. Περιοχή Μελέτης.....	5
2.1 Γενικά Στοιχεία.....	5
2.2 Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (EL08).....	5
2.2.1 Γενικά στοιχεία.....	5
2.2.2 Κύριες Υδρολογικές Λεκάνες.....	7
2.2.3 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.....	8
2.2.4 Κλιματικά χαρακτηριστικά.....	9
2.2.5 Γεωλογία.....	10
2.2.6 Διοίκηση.....	10
2.2.7 Χρήσεις γης και οικονομικά στοιχεία.....	12
2.2.8 Ανάγκες και χρήσεις νερού.....	13
2.2.9 Υδατικά συστήματα.....	15
2.2.10 Ενεργειακή παραγωγή.....	16
2.3 Συλλογή Δεδομένων.....	18
2.3.1 Γεωχωρικά Δεδομένα.....	18
2.3.2 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα.....	19
3. Μεθοδολογία.....	21
3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο μοντέλων.....	21
3.1.1 SWAT.....	21

3.1.2 LISFLOOD	24
3.2 Γενική περιγραφή διαδικασίας μοντελοποίησης και ελέγχου	26
3.2.1 Διαδικασία προγράμματος SWAT	26
3.2.2 Βαθμονόμηση και επαλήθευση μοντέλου	32
3.2.3 Έλεγχος βαθμονόμησης	33
3.3 Περιγραφή μοντελοποίησης στον άνω ρου του ποταμού Πηνειού	34
3.3.1 Προεπεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων με χρήση του Arcmap.....	34
3.3.2 Εφαρμογή του μοντέλου SWAT.....	35
3.3.3 Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου Πηνειού	45
4. Αποτελέσματα.....	53
4.1 Τελικές τιμές παραμέτρων και αποτελέσματα βαθμονόμησης	53
4.2 Επαλήθευση μοντέλου	57
4.3 Σύγκριση απορροών	59
5. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα	62
5.1 Γενικά συμπεράσματα μοντελοποίησης	62
5.2 Συμπεράσματα μοντέλων	62
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	68
6. Βιβλιογραφία	69
Αγγλική	69
Ελληνική.....	71
Ηλεκτρονικές Πηγές.....	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	73

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας ολοκληρώνεται η φοίτηση μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Έχω να κρατήσω πάρα πολλά από αυτό το ταξίδι. Έμαθα πολλά και γνώρισα πολύ σημαντικούς επιστήμονες και πάνω απ' όλα ανθρώπους. Οφείλω λοιπόν να αφιερώσω ένα κομμάτι της εργασίας σε αυτό.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, αυτούς που είναι ακόμα κοντά μου και αυτούς που έχουν φύγει, και τους φίλους μου για όλη την στήριξη και βοήθεια που μου παρείχαν όποτε την χρειάστηκα. Επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ και μπράβο αξίζουν όλοι οι καθηγητές, το εκπαιδευτικό και διοικητικό προσωπικό της σχολής που παρά τις αντιξοότητες συνεχίζουν να παρέχουν εκπαίδευση υψηλού επιπέδου. Ειδικά τα τελευταία δύο ακαδημαϊκά έτη ήταν ιδιαίτερα δύσκολα για όλους λόγω της αναγκαστικής αποχής από τα μαθήματα με φυσική παρουσία, ωστόσο η αντίδραση των καθηγητών ήταν παράδειγμα και για εμάς τους φοιτητές.

Πιο συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή κ. Ευάγγελο Μπαλτά ο οποίος μου έδωσε την δυνατότητα να μελετήσω το παρόν αντικείμενο σε επίπεδο διπλωματικής εργασίας και μου έδωσε σημαντικές συμβουλές για την ολοκλήρωση της. Επίσης ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτωρ κ. Γιώργο Μπαριάμη που χωρίς τις γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο και την διαρκή επικοινωνία μαζί του δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Τέλος, ευχαριστώ την τριμελή εξεταστική επιτροπή αποτελούμενη από τον κ. Ευάγγελο Μπαλτά, κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη και κ. Νικόλαο Μαμάση για τον χρόνο που αφιέρωσαν για την μελέτη και βαθμολόγηση της παρούσας εργασίας.

Λάμπρου Στέφανος

Αθήνα, Ιούλιος 2018

Extended Abstract

Introduction

Climate is changing and either natural or due to human intervention. According to the report published by the European Environment Agency “Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016”, climate change is having a variety of impacts on our health ecosystems and economy and these impacts are likely to become more severe in the coming decades. There is growing evidence that climatic change in recent decades have affected the global hydrological cycle. As a result, severe natural disasters, like droughts and river floods are more and more often. Between 1980 and 2013 the cost of damages has been up to almost 400 billion euros and the human losses have exceeded the 100,000 in Europe. Hydrological events account for one third of total number of disasters and cost of damages (EEA, 2016). The real challenge nowadays is the forecasting of these extreme events and the development of warning systems in vulnerable areas. For this purpose, during the past few years there is a considerable progress regarding the use of hydrological modeling and simulation programs.

Generally, a hydrological model is developed to generate stream flow data to either (Graham):

- Fill missing gaps in existing records
- Estimate the discharge, sediment yield and other parameters in catchments
- Generate long term future records for statistical analysis
- Provide input data for other research
- Undertake scenario and forecast modelling

This study is about the simulation of a subbasin of Pinios river basin in Thessaly, Greece, using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) program. Due to lack of field measurements of discharge and in order to accomplish the calibration and validation of the model, the results of the European hydrological model of the Joint Research Center are used. The program used by JRC is the LISFLOOD hydrological model. Finally, by using real data of mean annual discharge in 4 locations inside the study area a comparative analysis of the two models is realized.

The primary data for this study were acquired from the National Meteorological Agency, the Ministry of Energy and Climate Change, the European satellite program of Copernicus and the global Food and Agriculture Organization (FAO).

Study Area and Data Used

Study area

The study area is the Pinios river basin located in the district of Thessaly in central Greece. Pinios is the third longest river in Greece (205 km), with the biggest watershed in the country (9,500 km²) and the second biggest annual discharge among all national rivers (2,500 hm³). The basin is integrated in the water district of Thessaly (GR 08) and constitutes the main hydrological basin of Thessaly. Pinios springs from south mount range of Pindos and flows into the Aegean Sea in the region of Thermaikos Gulf. It passes through the Thessaly Plain, which is the biggest plain in Greece. The region is surrounded to the North by Olympus Mountain, to the west by Pindos, and to the East by Ossa. The Water District of Thessaly is divided in three sub-regions in respect to the climatic conditions. The eastern coastal region has Mediterranean climate, the central flat plain is described by continental climate and the western mountainous by mountainous climate. The average annual temperature of the district is 16 to 17 °C and the mean annual rainfall of the region is 678 mm. The land uses of the region are mostly agricultural land and forests. The urban area covers less than 1% of the total area

and serve a population of more than 700,000. The abstraction from the water bodies is used mostly for drinking water and irrigation and livestock farming purposes with a smaller amount concerning the industry and energy production needs. For water demand and distribution numerous infrastructure projects have been constructed like channel diversions, reservoirs, small scale dams and drillings. Even though the region has big water potential, the water equilibrium is lacking considering the need in restoring the surface and underground water bodies that have been overexploited for years. Inside the Water District 85 permanent and 60 non-permanent dams and reservoirs are currently operating. The energy production is still not very developed. The main electricity production construction is the artificial lake of Plastira with the respective power plant that produces energy of about 220 GWh in a year. The dam uses the water resources from Acheloos watershed, and the irrigation project and power plant are in the Pinios basin. Another, smaller in scale, hydro-electric project is installed at the Smokovo reservoir (Leontario power plant) with production potential of about 29 GWh annually. The diversion of the northern part of Acheloos river basin is under construction and it is considered a very important project that could contribute significantly to cover the water demand of Thessaly Water District (Koutsoyiannis et al., 2008; Ministry of Energy and Climate Change, 2017).

Data used

The simulation of a hydrological model demands two types of data. The first type is the arithmetical data that include the climatological parameters like rainfall, temperature, wind speed and others. The second type is the geospatial data of the region. Due to the large size of the Pinios basin and the extent of the stream definition, the region simulated in this study, is the northwestern part of the watershed that flows out south of the city of Trikala.

The meteorological data used are the rainfall, minimum and maximum temperature in daily step. These data were acquired by 4 stations of National Meteorological Agency (or EMY) and Ministry of Energy and Climate Change (or YPEKA) inside or close to the region. The geospatial data used are the Digital Earth Model, the Land Cover Map and the Soil Map of the region. The first two datasets were taken by “Copernicus Land Monitoring Service”, and the third one by Food and Agriculture Organization. In Table 1 the meteorological stations the data of which were used in this study are shown and in Figure 1 and 2 the basic values of meteorological data used are presented.

Table 1: Network of meteorological stations used for the simulation (source: EMY, www.hydroscope.gr)

Σταθμός - Υπηρεσία	Latitude (degrees)	Longitude (degrees)	Elevation (m)	Available Data
Trikala (EMY)	39.53	21.76	109	Rainfall, Temperature
Karditsa (YPEKA)	39.37	21.93	107	Rainfall
Agiofyllo (YPEKA)	39.86	21.56	584	Rainfall
Elati (YPEKA)	39.50	21.54	909	Rainfall

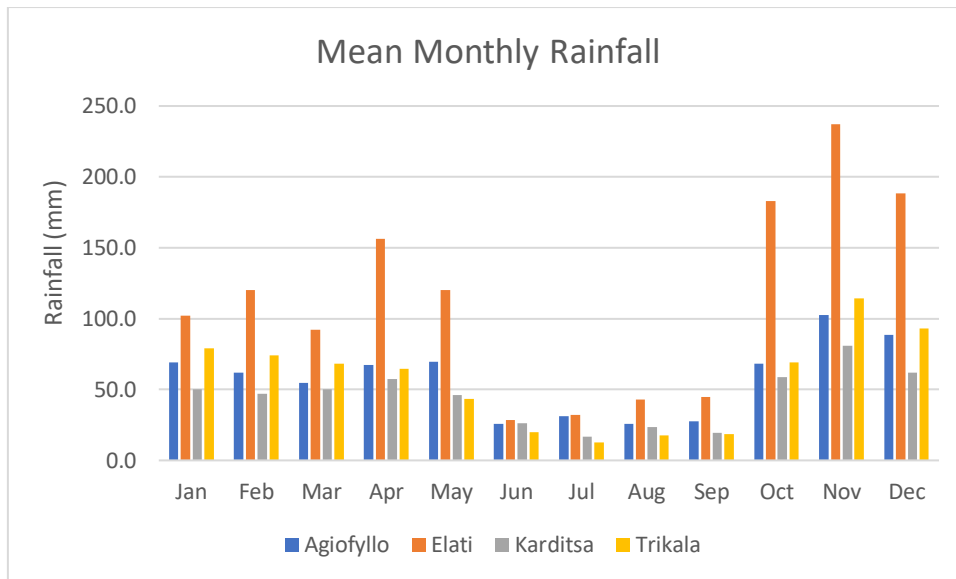


Figure 1: Monthly average rainfall of the available meteorological stations (source: EMY, <http://www.hydroscope.gr>)

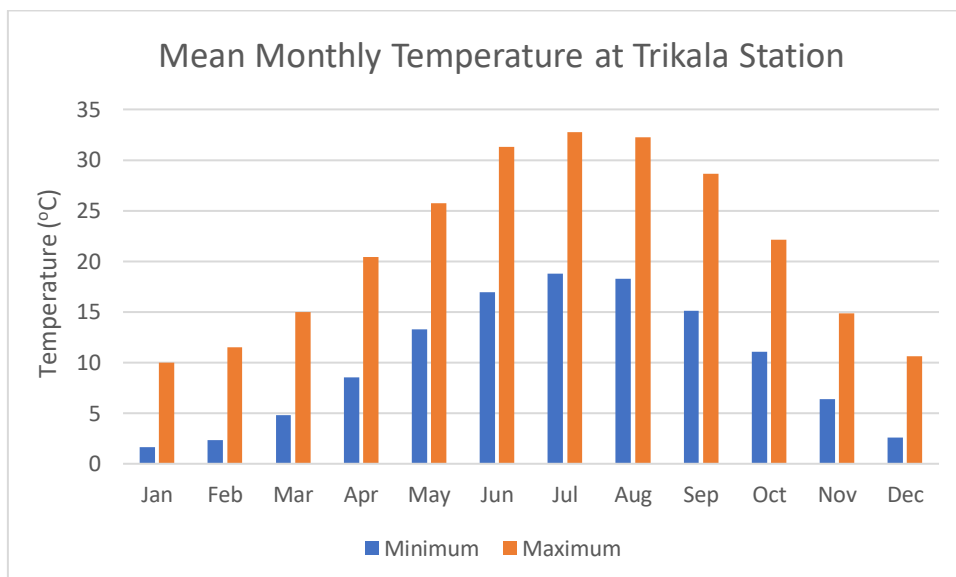


Figure 2: Average minimum and maximum daily temperature in Trikala station (source: EMY)

Methodology

Description of the models

SWAT

Soil and Water Assessment Tool or SWAT is a river basin or watershed, scale model developed by Dr. Jeff Arnold for the USDA Agricultural Research Service (ARS). Its purpose is to predict the impact of land management practices on water, sediment and agricultural chemical yields in large complex watersheds with varying soils, land use conditions over long periods of time. The model is physically based and therefore requires specific information about weather, soil properties topography, vegetation and land management practices occurring in the watershed. The necessary physical processes are directly modeled by SWAT. In addition, it uses readily available inputs, it is

computational efficient and allows users to study long-term impacts via a continuous time simulation process (Neitsch et al., 2009). The computational time-step of SWAT simulation is daily (Gassman et al., 2007) and is divided in two phases. For computational purposes, the model watershed is divided into subbasins so that every section of the hydrographic network belongs to each subbasin. When the land use, soil, and slope categories are defined each subbasin is further divided into Hydrologic Response Units (HRUs). Every HRU is comprised of unique land cover, soil, and slope class.

The first phase of the simulation process is the land phase of the hydrologic cycle. At every time step SWAT uses the water balance equation (equation 1):

$$SW_t = SW_0 \sum_{n=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E - Q_{perc} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Where SW_t is the final soil water content (mm H₂O), SW_0 is the initial soil water content on day n (mm H₂O), t is the period of simulation (days), R_{day} is the amount of precipitation on day n (mm H₂O), Q_{surf} is the amount of surface runoff on day n (mm H₂O), E is the amount of evapotranspiration on day n (mm H₂O), Q_{perc} is the amount of water entering the vadose zone from soil profile on day n (mm H₂O) and Q_{gw} is the amount of return flow on day n (mm H₂O).

The second phase is the routing phase of the hydrologic cycle which describes the flow of loadings of water, sediment, nutrients and pesticides in the main channel.

LISFLOOD

The LISFLOOD model is a hydrological rainfall-runoff spatially distributed model that is capable of simulating the hydrological processes that occur in a catchment. It has been developed by the floods group of the Natural Hazards Project of the Joint Research Centre (JRC) of the European Commission. The objective of the model is to be used for large transnational basin simulations for flood forecasting and assessing the effects of river regulation measures, land use change and climate change. The model is physically based (to a certain extent) and it is calibrated to simulate mostly European catchments and uses pan-European databases that contain soil (King et al., 1997; Wösten et al., 1999), land cover (CEC, 1993), topography (Hiederer & Roo, 2003) and meteorology (Rijks et al., 1998). The model is made up of 4 main routines that compute different parameters of the water balance equation. These are a 2-layer water balance sub-model, groundwater and subsurface flow models, sub model for the routing of the surface runoff to the nearest river channel and finally a channel flow routing model (Burek, 2013).

This model is being applied and constantly updated to produce daily results of river discharge of Europe. The data type and results are gridded with 5×5 km resolution. The series start from 1/1/1991 till the last completed calendar year. The calibration of the model for Europe is done automatically by a procedure based on the Shuffled Complex Evolution Metropolis (SCEM-UA) global optimization algorithm (Vrugt et al., 2003; Feyen, 2005).

Watershed modeling

The area chosen for the simulation is the Pinios basin in the outlet o Trikala. First step is the watershed delineation of the study area. For this process, the DEM raster dataset is loaded in the model and automatically, SWAT creates the stream network of the map. Then the exact location of the outlet is chosen and added to the map to complete the delineation. As a result, the basin is divided into multiple subbasins at every confluence of river channels. In Figure 3 the digital earth model of the study area along with the result of the delineation are shown. The total area of the watershed is 1756 km² and is divided into 17 subbasins.

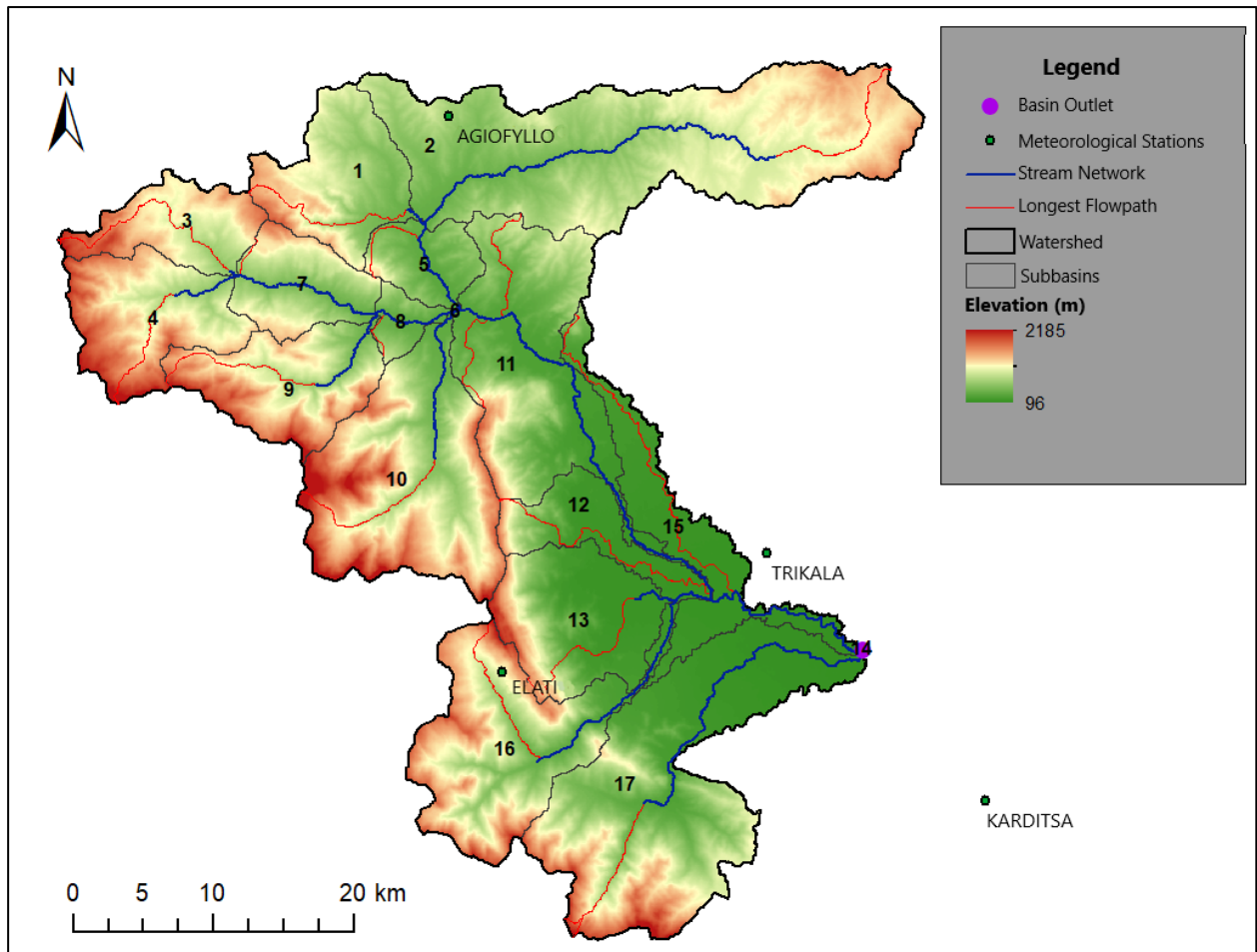


Figure 3: Watershed delineation and meteorological stations

After the delineation is complete the land use and soil maps are loaded. To use these maps firstly they have to be reclassified. Because SWAT is a model developed in the US the classification of land cover and soil groups is different from the European one that the datasets use. In the case of the land use map a research in bibliography and in similar studies, was realized for the correct match between Corine 2018 land cover and SWAT land use categories. Thus, the look up table is created and loaded in the model. For the reclassification of the soil map this procedure is done automatically using the Map Window tool, which is a free program that changes the SWAT soil database from the USDA textures to FAO soil classification of the map. A look up table is again created to address each soil to code to the polygons of the map and the reclassification is complete. Final step before creating the HRUs is the reclassification of slope map. In this case the map is divided into a number of slope classes chosen by the user. In Tables 2-4 the final classification of the three maps is indicated and the respective maps in Figures 4-6.

Table 2: SWAT Land Use classification

SWAT Land Use	Area (%)
URBN*	1.74
AGRC	6.42
AGRL	25.28
GRAP*	0.11
ORCD*	0.09
PAST	2.02
FRSD	17.34
FRSE	12.01
FRST	3.22
RNGE	12.58
RNGB	18.22
WATR	0.98

Table 3: Soil classification

FAO Soil Name	FAO Soil Code	Area %	Hydrologic Soil Group
Lithosols ⁺	I-Lc-3c-3113	0.29	C
Calcaric Regosols	Rc52-2-3b-6627	16.89	D
Chromic Luvisols	Lc104-2-3-3185	64.45	D
Calcaric Fluvisols	Jc60-3a-3143	13.22	D
Eutric Cambisols	Be129-1-2-6442	5.15	C

Table 4: Slope classification

Slope (%) Group	Area (%)
0-5	19.91
5-20	25.87
20-60	47.84
60+	6.38

* URBN, ORCD, GRAP categories are not included after the last step of HRU definition because the area they cover is too small.

⁺ Lithosol soil category is not included in the final map after the last step of HRU definition because the area it covers is too small.

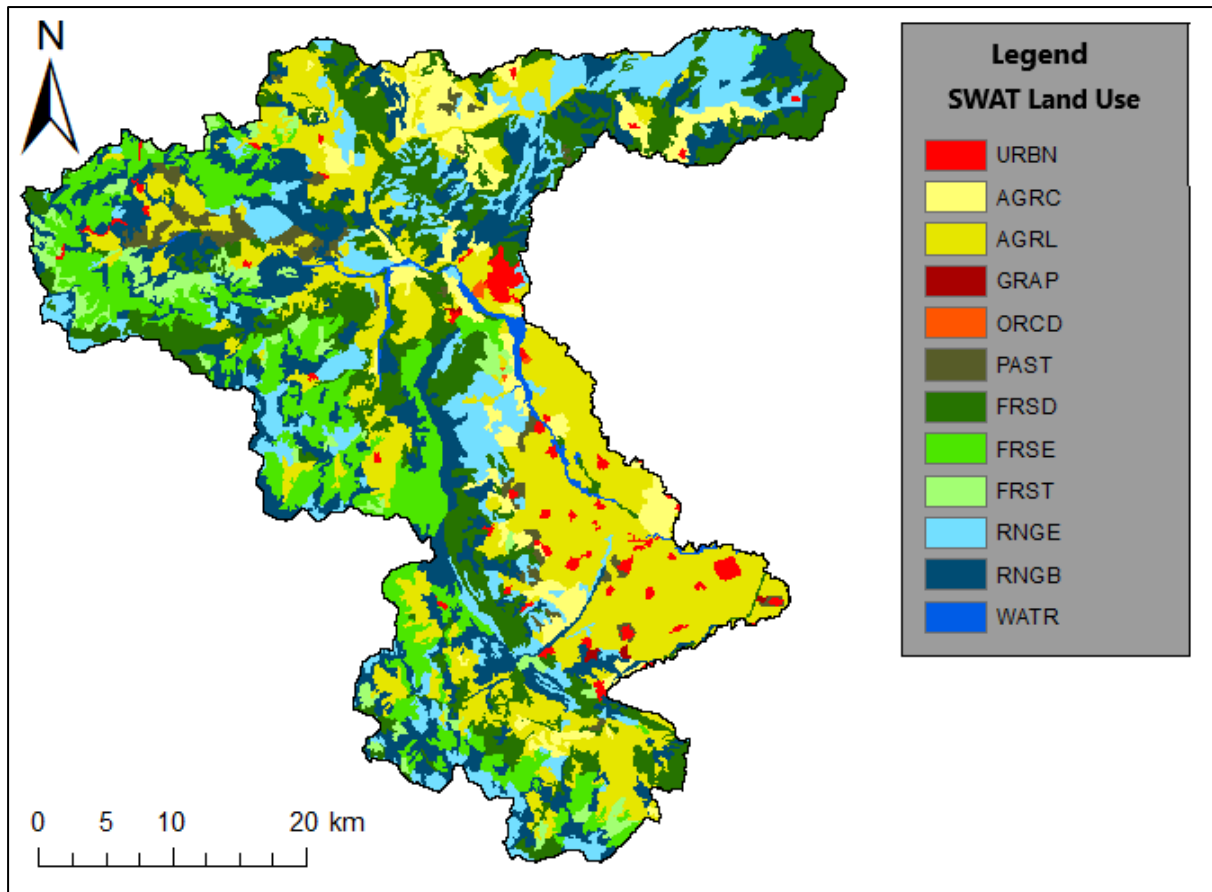


Figure 4: Land use map after reclassification

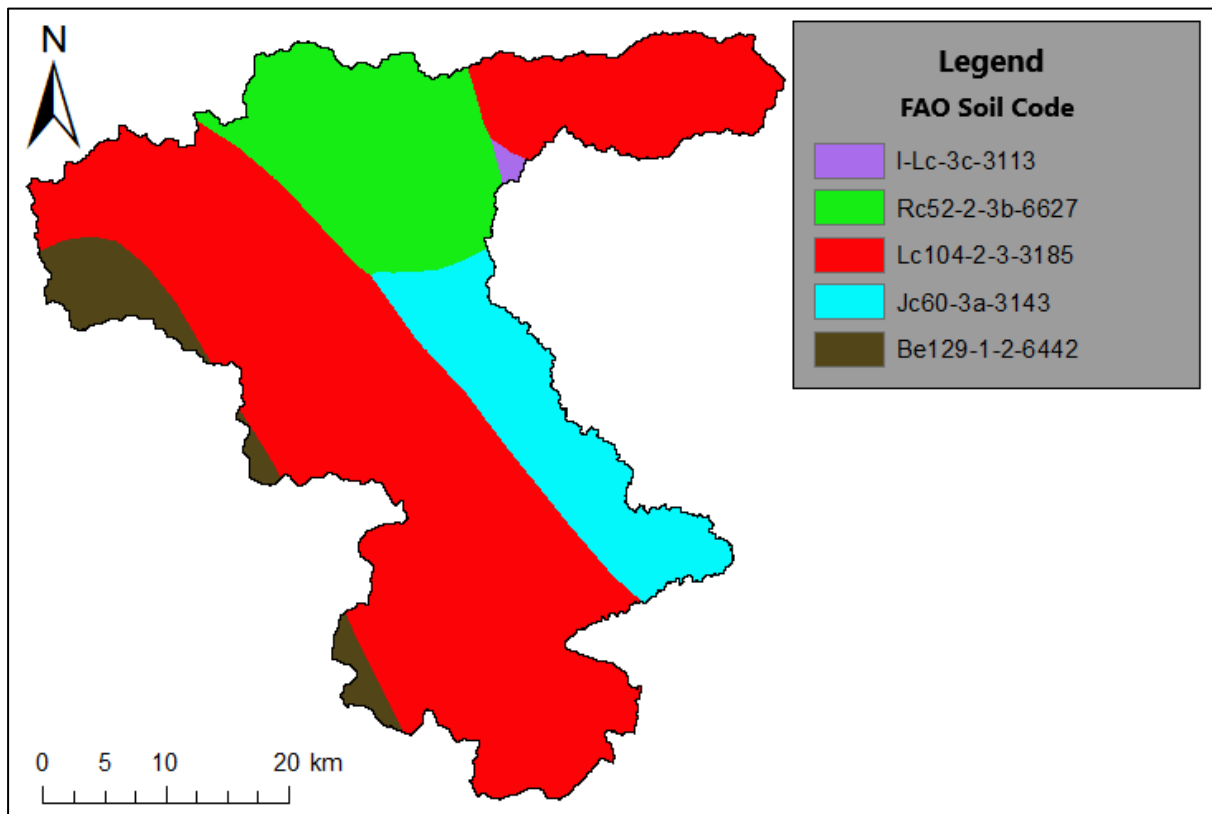


Figure 5: Soil map after reclassification

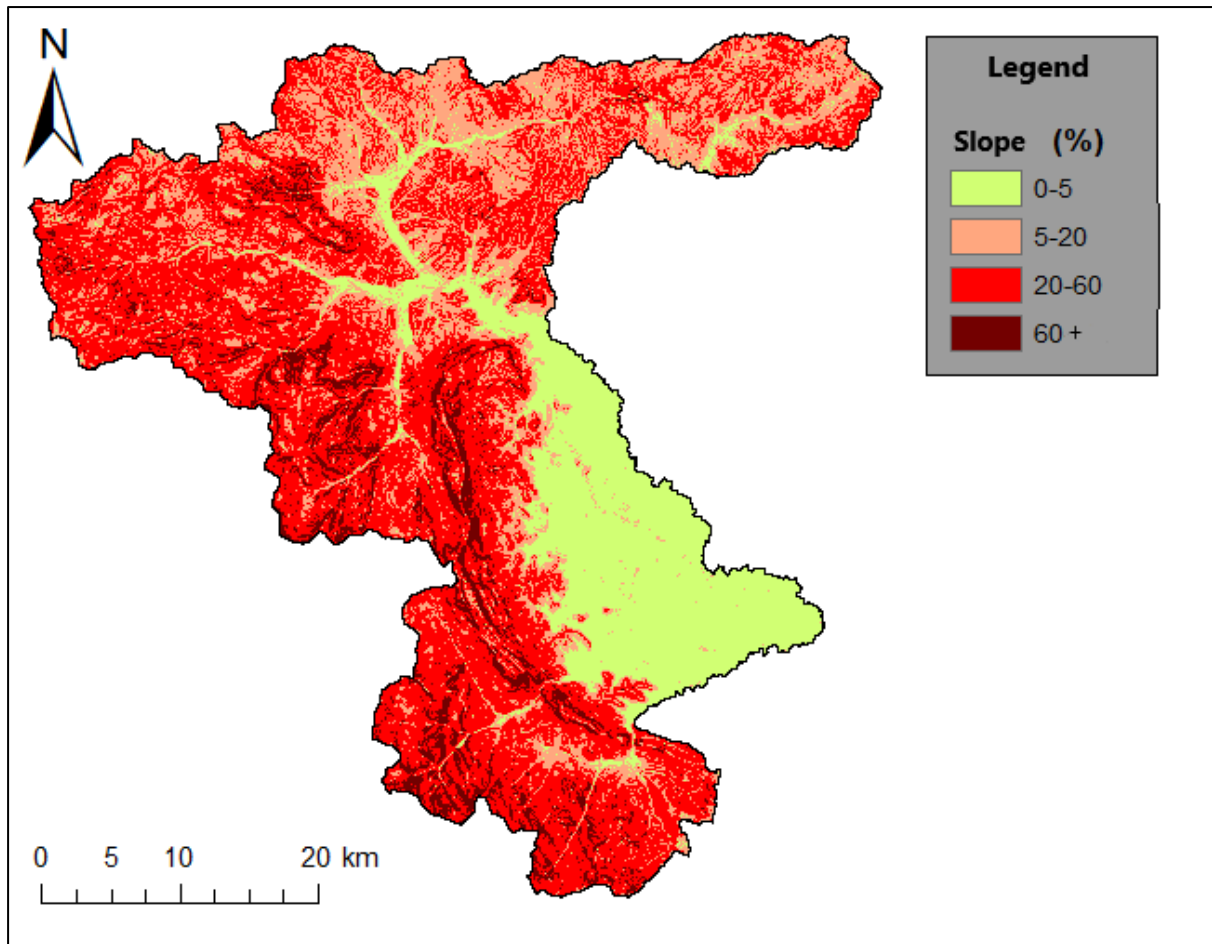


Figure 6: Slope map after reclassification

After the reclassification of the three parameters is completed then the maps are overlaid so that every pixel belongs to one category of land use, soil and slope. The final step is to define the thresholds of every parameter. This procedure eliminates minor land use, soil and slope in each subbasin. The thresholds are chosen equal to 10% for the land uses and 5% for soil and slope. After this the HRU definition can be realized. The spatial data are loaded and processed in the model.

The meteorological data are now ready to be imported to the model. For this study, the climatic data consists of rainfall and temperature data. For each set of data .txt files are created containing the series of each station. In addition, another .txt file is required in which the coordinates of the meteorological stations are defined. The time series extends from 1-1-1984 to 31-12-2001. When the meteorological parameters are entered all the tables of data are written to the database of the model and the simulation is ready to begin. The simulation period is the same as the data series' and the warm-up period is 3 years.

Model calibration and validation

After the original simulation, any SWAT model needs calibration based on real data. Because the acquisition of measurements of discharge values in the region was not possible, the results of LISFLOOD model for Europe were used. Three spots are chosen for the calibration. In this way the subbasins are divided into three groups for the calibration purposes. For the data series of the LISFLOOD model the pixels that are the closest to the three outlets are used. The three outlets for the

calibration are located near Kalampaka, in the greater area of Pyli and at the outlet of the basin (south of Trikala). In this study the calibration procedure is done manually by changing multiple parameters and by performing the simulation many times. The simulated discharges were compared to the results of the LISFLOOD model in monthly time step with the use of three statistical indexes the Nash-Sutcliffe coefficient (Nash-Sutcliffe, 1970), the R^2 and the PBIAS (Equations 2-4). The period for calibration is from September 1991 to September 1996. The same statistical indexes are used for the period of validation as well. The data series in this case are from October 1996 until December 2001.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{obs,av})^2} \quad (2)$$

Where $Q_{obs,i}$ is the observed discharge in time step i , $Q_{sim,i}$ is the simulated discharge in time step i and $Q_{obs,av}$ is the average of the observed data.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (3)$$

Where SS_{res} is the residual sum of squares and the SS_{tot} the total sum of squares.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs})} \quad (5)$$

Where $Y_{i,obs}$ is the observed discharge in step i and $Y_{i,sim}$ is the simulated discharge in step i .

During the manual calibration there are many parameters that can be changed. From bibliography and similar studies some of them are chosen to be processed. Regarding the simulation of this study the statistical tests are generally not satisfactory. To be able to extract safe conclusions from this study the two models are compared with real measured data of mean annual discharge volume in 4 places inside the watershed. The places are located in the regions of Pyli, Mouzaki, Gavros and Sarakina (Koutsoyianis et al., 2008). The main hydrologic properties of the basins such as runoff coefficient and runoff per unit of surface are compared and based on the results a comparative analysis of the two models is realized.

Results

The final parametrization of the SWAT model is based on the calibration process. The parameters were changed in an attempt to reach satisfactory statistical tests. This was not achieved but still the calibration took place until the two series were fitted as well as possible by always keeping the values of each parameter inside the normal boundaries. In Table 4 the parameters that were processed with their original and final range of values are presented. The diagrams of the final data series compared to each other are shown in Figures 7-9 for calibration and Figures 10-12 for validation.

Table 5: Processed parameters and their final values after the calibration

Table	Parameter	Definition	Units	Original Range	Final Range
.mgt	CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	Dimensionless	70-92	45-92
.sol	SOL_AWC (layer1)	Available water capacity of soil layer 1	mm H ₂ O/mm soil	0.116-0.17	0.12-0.21
	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	1/days	0.048	0-0.8
	GW_DELAY	Groundwater delay time	days	31	65
.gw	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	mm H ₂ O	1000	2000
	GW_REVAP	Groundwater “revap” coefficient	Dimensionless	0.02	0.05-0.1
	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	Dimensionless	0.05	0.1-0.5
	REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for “revap” or percolation to the deep aquifer to occur	mm H ₂ O	750	300-750
.hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	Dimensionless	0.95	0.4-0.75
.rte	CH_N(2)	Manning’s “n” value for main channel	Dimensionless	0.014	0.04-0.06

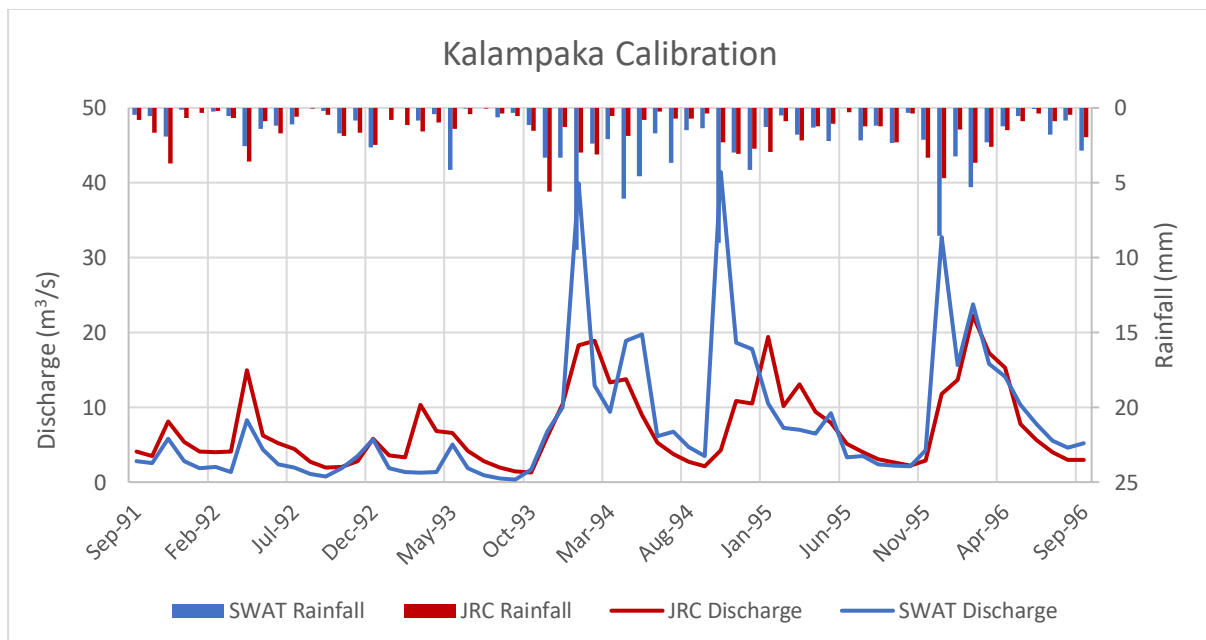


Figure 7: Diagram of SWAT and JRC time series in calibration period at Kalampaka

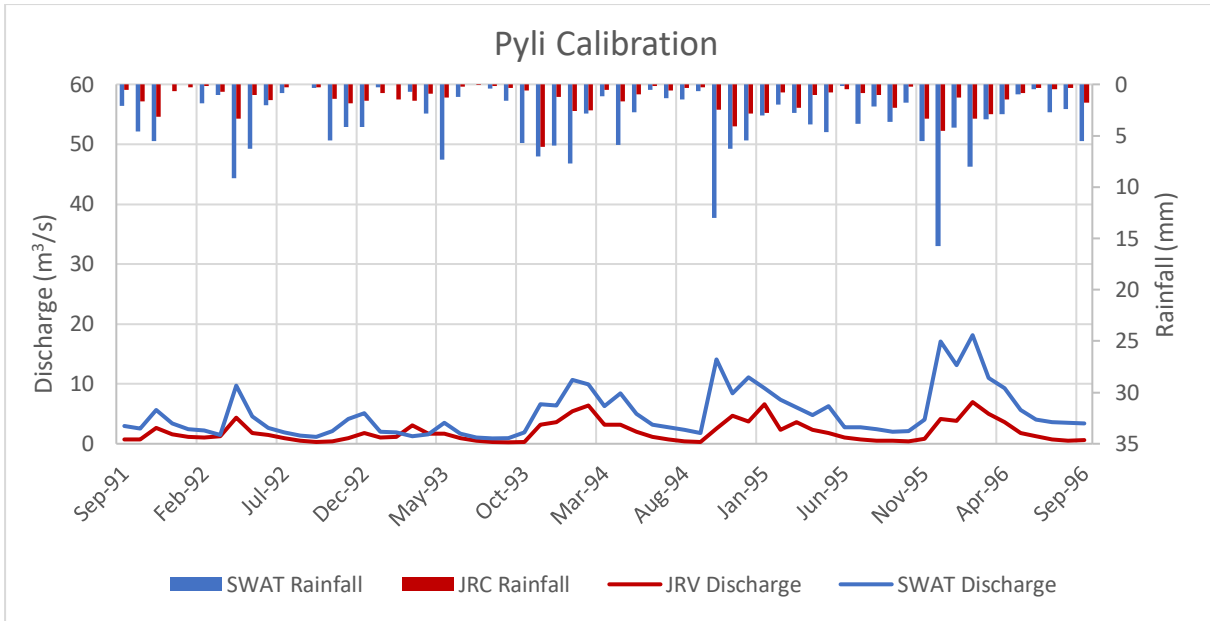


Figure 8: Diagram of SWAT and JRC time series in calibration period at Pyli

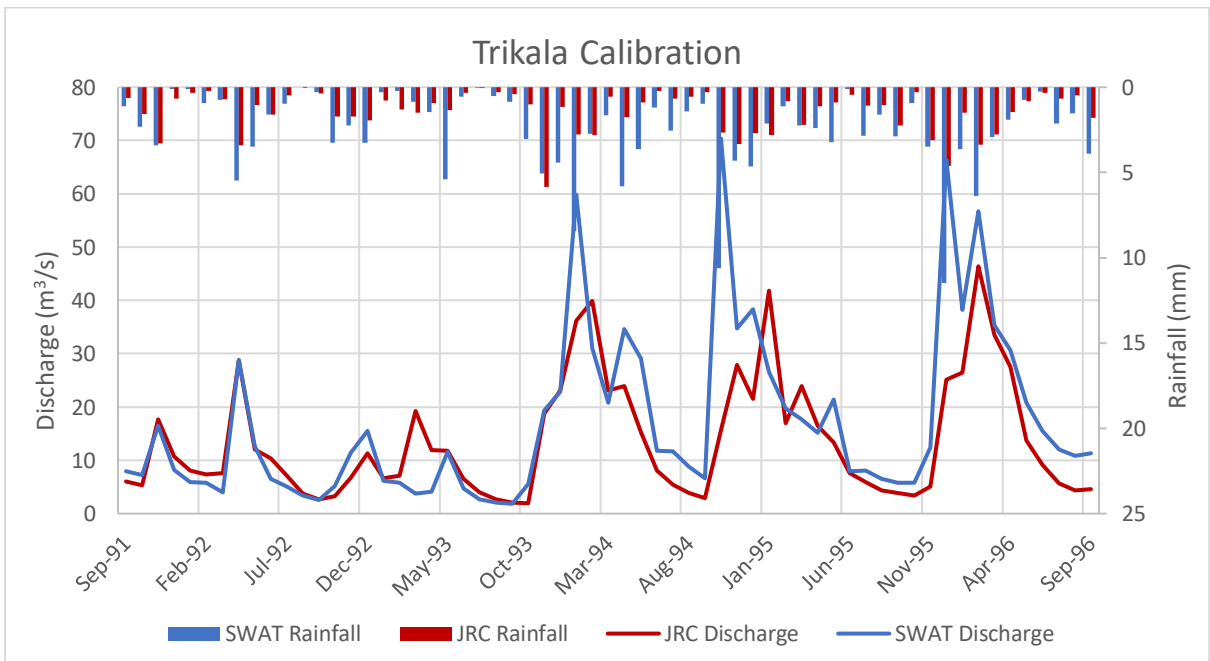


Figure 9: Diagram of SWAT and JRC time series in calibration period at Trikala

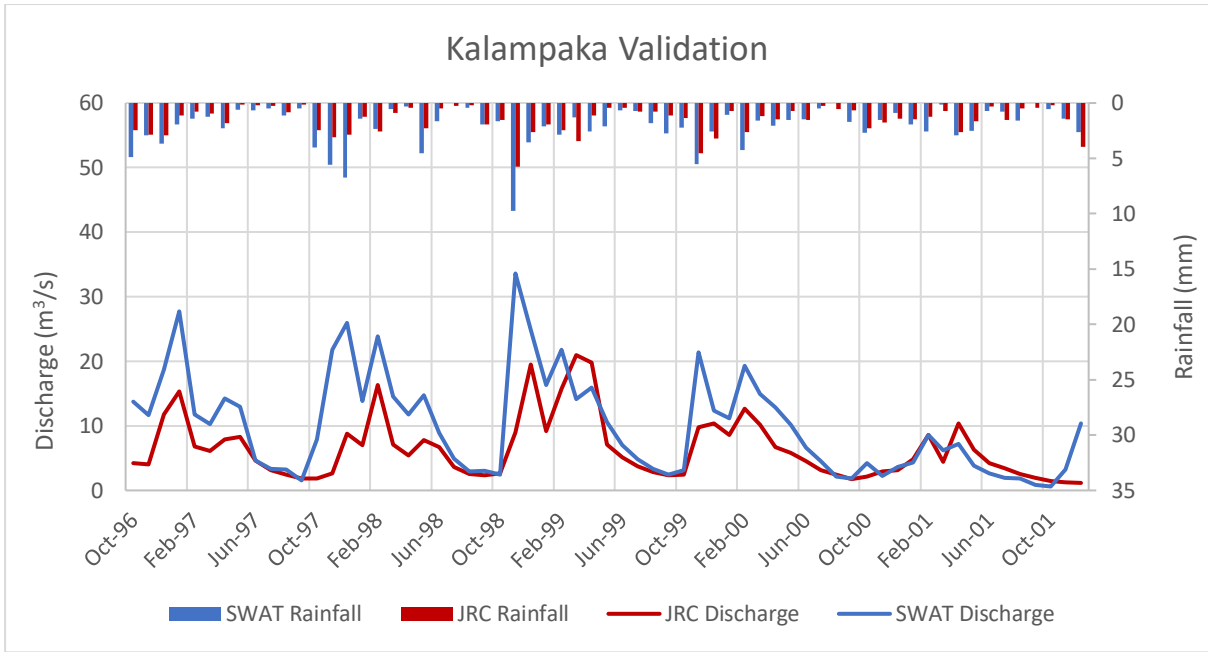


Figure 10: Diagram of SWAT and JRC time series in validation period at Kalampaka

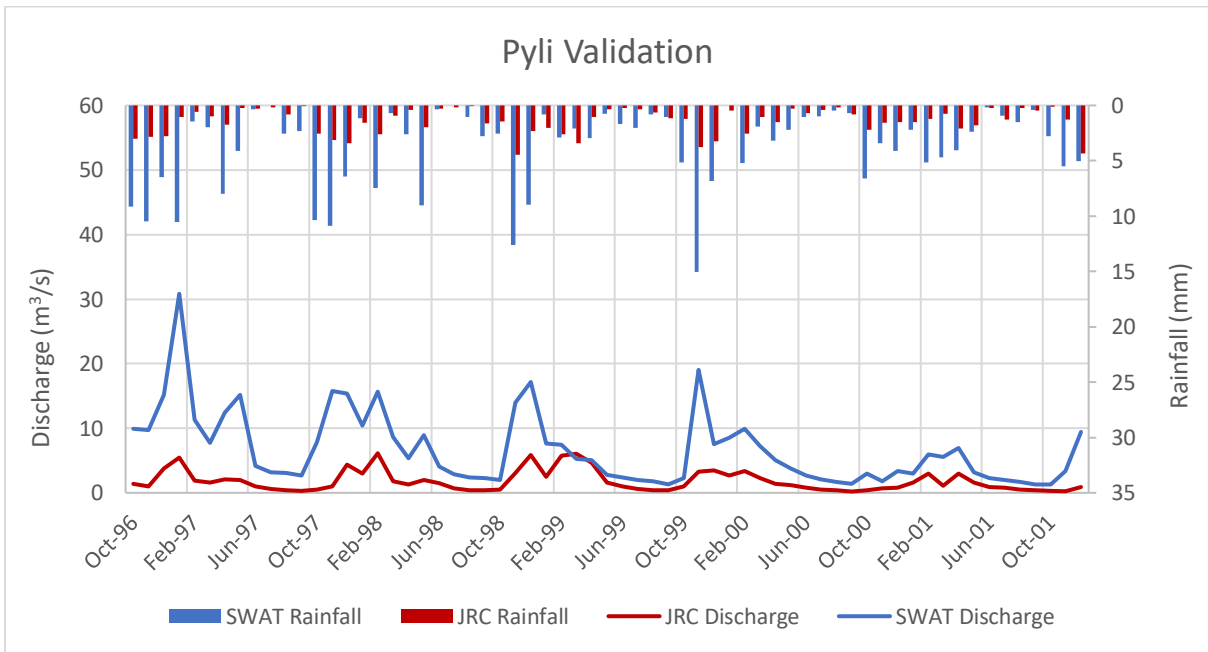


Figure 11: Diagram of SWAT and JRC time series in validation period at Pyli

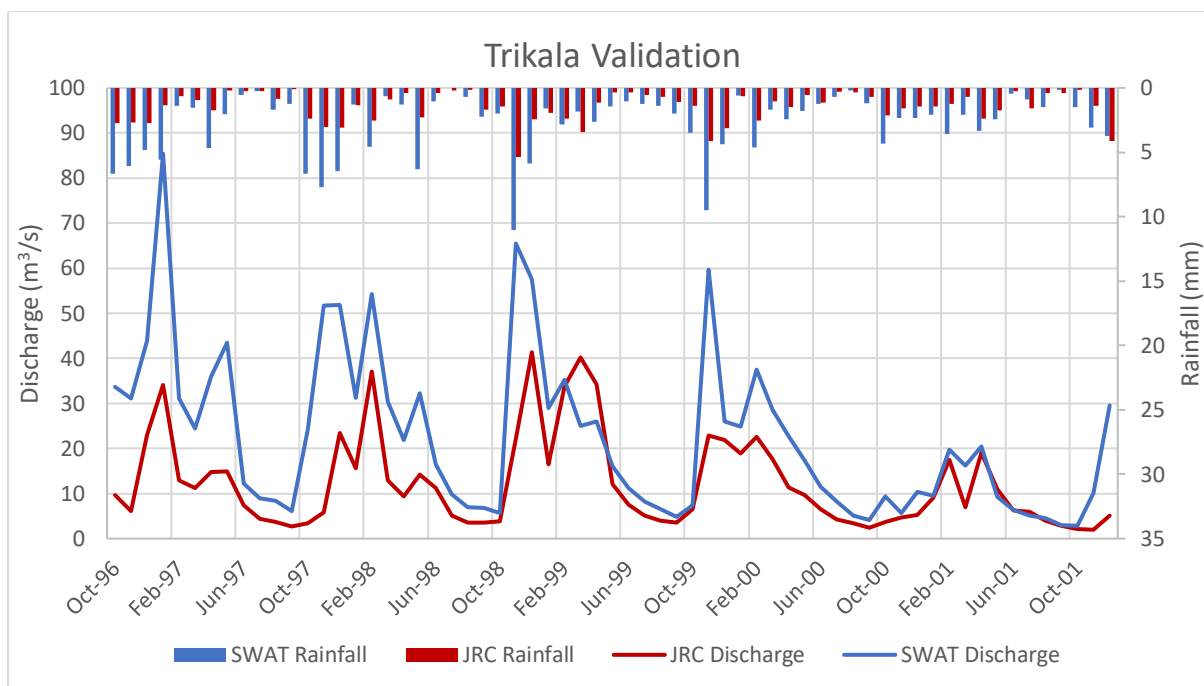


Figure 12: Diagram of SWAT and JRC time series in validation period at Trikala

It is clear before computing any statistical index that the results of the two models have a significant difference. SWAT generally overestimates the amount of rainfall and discharge especially during the months of winter and spring. In dry periods, the two simulations the deviation is much smaller. However, the relative extremums of the SWAT series generally comply in timing with the LISFLOOD results. There is practically no time lag between the two models and this fact can be understood also by the indexes that are calculated where in the case of NSE the values are completely unsatisfactory for the classical methods of calibration but the R^2 indicates a much better relation. The values of the three indexes used in this study for calibration and validation are shown in Table 6.

Table 6: Values of the statistical coefficients for calibration and validation

	Calibration			Validation		
	Kalampaka	Pyli	Trikala	Kalampaka	Pyli	Trikala
NSE	-0.8	-4.6	0	-0.83	-16.5	-1.5
R^2	0.37	0.69	0.57	0.52	0.45	0.54
PBIAS	-9%	-151%	-26%	-55%	-269%	-83%

After the calibration and validation process the next step of the analysis is the comparison of annual total runoff in 4 areas with real available data. For this purpose, the mean annual rainfall and runoff is computed in the subbasins of interest and then the runoff coefficient (C) along with the runoff per unit of surface (E) are estimated. The discharge data analyzed from SWAT and LISFLOOD is chosen to be as close as possible to the locations of the measured data by selecting the equivalent subbasin (for SWAT) and pixel (for LISFLOOD). In Table ... the hydrological quantities and their values are presented. SWAT model seems to accord better with the already published estimations. In the subbasins of Pyli and Mouzaki which are neighboring subbasins of Pinios with the same basic properties it is expected that the hydrologic properties will be similar. In addition, the known data indicate that these two areas have large runoff coefficient in comparison to the other two locations. These two characteristics emerge from the SWAT simulation as well. LISFLOOD simulation is very spatially insensitive, and the

hydrological quantities are almost the same at every location. This is explained by pixel dimensions of the grid of the rainfall and discharge that LISFLOOD model uses.

Table 7: Hydrological characteristics at the 4 outlets of interest

	National Program of Management and Protection of Water Resources (2008)		SWAT Model		LISFLOOD Model	
	C	E (hm ³ /km ²)	C	E (hm ³ /km ²)	C	E (hm ³ /km ²)
Pyli	0.56	0.94	0.45	0.61	0.44	0.23
Mouzaki	0.50	0.68	0.45	0.61	0.42	0.22
Gavros	0.22	0.17	0.23	0.15	0.44	0.23
Sarakina	0.22	0.22	0.36	0.24	0.43	0.23

Conclusions

In this study there has been an attempt to calibrate and estimate the water balance of a subbasin of Pinios river using the European data provided by Copernicus Land Monitoring Service that uses the LISFLOOD model for simulation. In this case the results did not fit properly during the calibration process. This fact can be explained by examining the input data of the LISFLOOD model. The rainfall data used for the simulation are interpolated data from an inadequate network of stations that can not interpretate the spatial fluctuations in rainfall volume. Secondly the pixels of the grid from which the results are acquired have a dimension of 5×5 km. In the case of SWAT, the results are representing specifically the discharge of the river. This difference is producing deviation in discharge time series. LISFLOOD is a model that is constantly being updated. The purpose of it is to produce quickly an estimation of the discharge so it can be used for research. The area that covers is the whole of Europe, so every attempt to increase the precision by limiting the grid dimensions would have a big impact in the computational load and as a result in the time needed for the simulation to be completed. The overall conclusions derived from the analysis of this study is that SWAT is a tool that can be easily implemented in any catchment with basic spatial and meteorological data and LISFLOOD can serve as a reference point in some basic aspects of the results such as the seasonality and trend of the series. In the future more watershed in Greece should be modeled with SWAT and compared with LISFLOOD to estimate the mean deviation of the two models and their level of confidence.

1. Εισαγωγή

Το κλίμα αλλάζει, είτε φυσικά είτε λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας και τα ακραία καιρικά φαινόμενα γίνονται όλο ένα και πιο συχνά. Σύμφωνα με την έκθεση «Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016» (Κλιματική αλλαγή, επιπτώσεις και ευπάθεια στην Ευρώπη 2016) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (European Environment Agency ή ΕΕΑ) η κλιματική αλλαγή προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, τα οικοσυστήματα και την οικονομία, συχνά σε αλληλεπίδραση με άλλους τομείς όπως η μεταβολή των χρήσεων γης και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις στα υδάτινα συστήματα. Οι επιπτώσεις αυτές, προβλέπεται να γίνουν σοβαρότερες κατά την διάρκεια των επόμενων δεκαετιών. Η κλιματική αλλαγή έχει επηρεάσει σημαντικά τον παγκόσμιο υδρολογικό κύκλο προκαλώντας σημαντικές αλλαγές στην ροή των ποτάμιων συστημάτων. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία αύξηση της συχνότητας των πλημμυρικών φαινομένων αλλά και των ξηρασιών σε πολλές περιοχές. Ενδεικτικά για τις 33 χώρες μέλη του ΕΕΑ το συνολικό εκτιμώμενο κόστος εξ αιτίας των φυσικών καταστροφών ανέρχεται στα 393 δις. Ευρώ σε ένα σύνολο 4,443 καταστροφών από το 1980 έως το 2013 με τον συνολικό αριθμό θυμάτων να ξεπερνάει τα 100,000. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι το 1/3 των καταγεγραμμένων καταστροφών αφορά υδρολογικά γεγονότα όπως οι πλημμύρες. Σημειώνεται επίσης ότι το κόστος που έχει προκληθεί από τις φυσικές καταστροφές στην Ελλάδα για την ίδια περίοδο ανέρχεται περίπου στα 7.5 δις. Ευρώ. (ΕΕΑ, 2016).

Η σωστή πρόγνωση των φυσικών φαινομένων είναι απαραίτητη για την ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης για την αποφυγή καταστροφών και ανθρώπινων απωλειών αλλά και για την ασφάλεια των υποδομών και λοιπών κατασκευών πολιτικού μηχανικού. Για το σκοπό αυτό τα τελευταία χρόνια έχει διευρυνθεί η χρήση υδρολογικών μοντέλων προσομοίωσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια μοντελοποίησης μίας υπολεκάνης του ποταμού Πηνειού με έξοδο στην ευρύτερη περιοχή των Τρικάλων με χρήση του αμερικάνικου προγράμματος Soil and Water Assessment Tool (SWAT) για την χρήση του σε προγνώσεις μελλοντικών σεναρίων και διαχειριστικών προκλήσεων της ευρύτερης περιοχής. Για την επαλήθευση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ελλείψει πραγματικών μετρήσεων παροχής, λαμβάνονται τα αποτελέσματα του πανευρωπαϊκού μοντέλου του Joint Research Center (JRC) που προκύπτουν από το πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης LISFLOOD. Τέλος, πραγματοποιείται μία συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των δύο με την χρήση βασικών υδρολογικών παραμέτρων και με την βοήθεια πραγματικών ετήσιων απορροών εντός της λεκάνης.

Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης συλλέχθηκαν πρωτογενή δεδομένα από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, το Υπουργείο Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, το δορυφορικό πρόγραμμα Copernicus του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος και τον Παγκόσμιο Οργανισμό Τροφίμων. Στη συνέχεια του κεφαλαίο παρουσιάζεται η έννοια του υδρολογικού κύκλου που είναι η αρχή κάθε υδρολογικής διεργασίας και ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία περί μοντελοποίησης και προσομοίωσης.

1.1 Υδρολογικός Κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος, ή αλλιώς ο κύκλος του νερού, περιγράφει την αέναη κίνηση του νερού ανάμεσα στους ωκεανούς, την ατμόσφαιρα και την ξηρά, που συνοδεύεται από αλλαγές ανάμεσα στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του νερού (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018). Παρακάτω δίνεται μία σχηματική περιγραφή του υδρολογικού κύκλου (Εικόνα 1). Επιπλέον στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται μια πιο λεπτομερής καταγραφή της κατανομής του νερού στη Γη.



Εικόνα 1: Υδρολογικός κύκλος (πηγή:USGS, 2018)

Πίνακας 1: Εκτίμηση παγκόσμιας κατανομής νερού (Πηγή: Gleick P. H., 1996)

Μορφή Νερού	Όγκος νερού (km ³)	Ποσοστό γλυκού νερού (%)	Ποσοστό συνολικού νερού (%)
Ωκεανοί, Θάλασσες & Κόλποι	1,338,000,000	-	96.5
Παγόβουνα, Παγετώνες & Μόνιμο χιόνι	24,064,000	68.7	1.74
Αλμυρό Υπόγειο Νερό	12,870,000	-	0.94
Γλυκό Υπόγειο Νερό	10,530,000	30.1	0.76
Εδαφική Υγρασία	16,500	0.05	0.001
Εδαφικός πάγος & Μόνιμα παγωμένο έδαφος	300,000	0.86	0.022
Γλυκές Λίμνες	91,000	0.26	0.007
Αλμυρές Λίμνες	85,400	-	0.006
Ατμόσφαιρα	12,900	0.04	0.001
Έλη	11,470	0.03	0.0008
Ποταμοί	2,120	0.006	0.0002
Βιολογικό Νερό	1,120	0.003	0.0001
Σύνολο	1,386,000,000	100	100

Αντιλαμβανόμαστε εύκολα ότι το γλυκό νερό το οποίο είναι αξιοποιήσιμο αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού παγκόσμιου αποθέματος. Συνεπώς, η σωστή διαχείριση του και προστασία του από πηγές μόλυνσης είναι ιδιαίτερα σημαντική. Σε αυτή την κατεύθυνση δουλεύουν τα υδρολογικά μοντέλα προσομοίωσης λύνοντας ουσιαστικά τον υδρολογικό κύκλο βασιζόμενα σε διάφορες παραμέτρους παράγοντας αποτελέσματα χρήσιμα για την αντιμετώπιση διαχειριστικών και άλλων προβλημάτων.

1.2 Μοντέλα βροχής – απορροής

Γενικά τα μοντέλα βροχής απορροής είναι τα συχνότερα εργαλεία για την διερεύνηση των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη φύση. Ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων έχουν αναπτυχθεί, τα οποία αφορούν από μικρές λεκάνες μέχρι και παγκόσμια μοντέλα. Τα εργαλεία αυτά λειτουργούν για λεκάνες ανεξάρτητα από το αν υπάρχουν σταθμοί μέτρησης εντός αυτής και μπορούν να μελετήσουν ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων όπως:

- Πρόγνωση πλημμυρών
- Σωστή διαχείριση υδατικών πόρων
- Αξιολόγηση ποιότητας νερού
- Διάβρωση και στερεομεταφορά
- Κυκλοφορία χημικών στα υδάτινα σώματα
- Αλλαγή χρήσεων γης
- Κλιματική αλλαγή

Τα μοντέλα βροχής – απορροής αποτελούνται από εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τις διεργασίες που συμβαίνουν σε μία λεκάνη απορροής και εκτιμούν την απορροή ως συνάρτηση διάφορων παραμέτρων. Τα μοντέλα αυτά κατηγοριοποιούνται με βάση τις παραμέτρους που λαμβάνουν υπόψιν, καθώς και την έκταση της επιρροής των φυσικών νόμων σε αυτά. Τα μοντέλα μπορούν να χωριστούν σε συγκεντρωτικά (lumped) ή κατανεμημένα (distributed), σε ντετερμινιστικά (deterministic) ή στοχαστικά (stochastic), σε στατικά (static) ή δυναμικά (dynamic) και σε εμπειρικά (empirical), εννοιολογικά (conceptual) ή βασισμένα στους φυσικούς νόμους (physically based). Η τελευταία κατηγοριοποίηση είναι από τις πιο σημαντικές. Μερικά από τα χαρακτηριστικά αυτής φαίνονται στον Πίνακα 2. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί πως όλων των ειδών τα μοντέλα διαθέτουν ορισμένα μειονεκτήματα στον τρόπο λειτουργίας και εφαρμογής τους όπως η φιλικότητα προς τον χρήστη ή ο μεγάλος όγκος δεδομένων που απαιτούν. Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν στοιχεία που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό ένα μοντέλο βροχής απορροής όπως ο χάρτης εδάφους και τα μετεωρολογικά δεδομένα (Gayathri K. Devi et al., 2015).

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά μοντέλων (Gayathri K. Devi et al., 2015)

Εμπειρικό μοντέλο	Εννοιολογικό μοντέλα	Μοντέλο βασισμένα στους φυσικούς νόμους
Βασίζεται στα διαθέσιμα δεδομένα	Παραμετρικό	Μηχανιστικό
Περιλαμβάνει μαθηματικές εξισώσεις που προκύπτουν από την ανάλυση δεδομένων χρονοσειρών	Βασίζεται στην μοντελοποίηση ταμιευτήρων και περιλαμβάνει ημιεμπειρικές εξισώσεις	Βασίζεται στην χωρική κατανομή και αξιολογεί τις φυσικές παραμέτρους
Δεν λαμβάνει υπόψιν τις διεργασίες του συστήματος	Οι παράμετροι προκύπτουν από μετρήσεις και βαθμονόμηση	Χρειάζεται αρχικές συνθήκες και μορφολογία
Καλή προβλεπτική ικανότητα, μικρό βάθος εξήγησης	Μπορούν να προγραμματιστούν σε Η/Υ	Πολύπλοκο μοντέλο που απαιτεί σχετική εξειδίκευση
Παράδειγμα: Μοναδιαίο υδρογράφημα	Παράδειγμα: HBV model	Παράδειγμα: SWAT

1.3 Υδρολογική προσομοίωση

Η ανάπτυξη των υπολογιστών την δεκαετία του 1960 συνέβαλε στην ανάπτυξη των υπολογιστικών υδρολογικών μοντέλων καθώς παρείχε μία άνευ προηγουμένου δυνατότητα πραγματοποίησης υπολογισμών. Έτσι, έγινε πραγματικότητα η πρώτη προσομοίωση του υδρολογικού κύκλου με την ανάπτυξη του Stanford Watershed Model (Crawford and Linsley, 1966) η οποία ακολουθήθηκε από την ανάπτυξη πολλών άλλων αντίστοιχων μοντέλων.

Στη συνέχεια εντάχθηκε σε αυτό η έννοια της βελτιστοποίησης και των τεχνικών λειτουργιών, βάση για την διαχείριση ταμιευτήρων και την προσομοίωση σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Επόμενο βήμα αποτελεί η δισδιάστατη και τρισδιάστατη μοντελοποίηση μέσω της ανάπτυξης στο κλάδο της αριθμητικής ανάλυσης κατά την οποία αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης των υπόγειων νερών και της διήθησης (Bear, 1979; Pinder and Celia, 2006; Remson et al., 1971). Με την συνεχή ανάπτυξη του κλάδου, κατέστη δυνατή η ταυτόχρονη προσομοίωση διαφόρων παραμέτρων όπως η ροή, η στερεομεταφορά και η μεταφορά των ρύπων μέσα στο νερό (Bear and Verruijt 1987; Charbeneau 2000). Στην συνέχεια αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης μεγάλων λεκανών απορροής με μικρό χρονικό βήμα υπολογισμού της τάξης των λεπτών ή δευτερολέπτων (Molley and Wesse, 2009; Sorooshian et al., 2008), και τέλος η σύνδεση όλων αυτών στην πρόγνωση των κατακρημνισμάτων, της κλιματικής αλλαγής (Sorooshian et al. 2008) και άλλων συναφών επιστημών (Vijay P. Singh, 2018).

Η διάρθρωση της εργασίας είναι η εξής:

- Εισαγωγή: Περιγραφή του προβλήματος και του στόχου της εργασίας
- Περιοχή Μελέτης: Περιγραφή της περιοχής όπου λαμβάνει χώρα η παρούσα μελέτη
- Μεθοδολογία: Περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται για την ανάπτυξη του μοντέλου SWAT, τον τρόπο εκμετάλλευσης των αποτελεσμάτων του JRC για την βαθμονόμηση του και τον τρόπο σύγκρισης των δύο μοντέλων μέσω μετρήσεων πεδίου.
- Αποτελέσματα: Παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων
- Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

2. Περιοχή Μελέτης

2.1 Γενικά Στοιχεία

Ο Πηνειός ποταμός έχει μήκος 205 km ενώ η έκταση της λεκάνης απορροής του φτάνει περίπου τα 9,500 km². Αποτελεί τον τρίτο μεγαλύτερο σε μήκος αμιγώς ελληνικό ποταμό της χώρας μετά τον Αχελώο και τον Αλιάκμονα και τον δεύτερο σε ετήσια απορροή πίσω από τον Αχελώο. Η λεκάνη απορροής του Πηνειού είναι η μεγαλύτερη της Ελλάδας. Το όνομα του προέρχεται από τον ομώνυμο ποτάμιο θεό της ελληνικής μυθολογίας, γιο του Ωκεανού και της Τηθύος. Η λεκάνη εντάσσεται στο Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας (GR 08 ή EL 08) και αποτελεί την κύρια υδρολογική λεκάνη της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας. Ο Πηνειός δέχεται τις απορροές πολλών παραποτάμων με σημαντικότερους στα νότια τον Ενιπέα, στα δυτικά τον Πορταϊκό και στα βόρεια τον Ληθαίο (που διασχίζει την πόλη των Τρικάλων). Ο Πηνειός πηγάζει από την νότια Πίνδο και εκβάλλει στο Αιγαίο πέλαγος στην περιοχή του Θερμαϊκού κόλπου και πιο συγκεκριμένα, νότια του ακρωτηρίου του Πλαταμώνα, όπου και δημιουργεί μικρό δέλτα. Διασχίζει τον Θεσσαλικό κάμπο, την κοιλάδα των Τεμπών αλλά και κάποια από τα μεγαλύτερα αστικά κέντρα της Περιφέρειας Θεσσαλίας, όπως τα Τρίκαλα και η Λάρισα. Στο μεγαλύτερο του κομμάτι ο Πηνειός διατρέχει εκτάσεις μικρών κλήσεων με μικρή ταχύτητα ροής (Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, 1996). Οι κύριες χρήσεις του νερού του Πηνειού είναι η άρδευση και η ύδρευση της περιοχής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι έντονες γεωργικές και κτηνοτροφικές πρακτικές σε συνδυασμό με τα αστικά λύματα αποτελούν την κύρια πηγή ρύπανσης των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων της λεκάνης (Κουτσογιάννης κ.α., 2008). Το 2005 χαρακτηρίστηκε από το Ευρωπαϊκό Συνέδριο Υδροηλεκτρικής Ενέργειας (European Hydro-Energy Conference) ο πιο ρυπασμένος ποταμός της Ελλάδας και ο δεύτερος πιο ρυπασμένος της Ευρώπης πίσω μόνο από τον ποταμό Πάδο στη βόρεια Ιταλία. Στον Πίνακα 3 φαίνονται γενικά στοιχεία των μεγαλύτερων ελληνικών ποταμών.

Πίνακας 3: Τα κυριότερα στοιχεία των μεγαλύτερων ελληνικών ποταμών

Ποταμός	Μήκος (km)	Απορροή (hm ³)	Έκταση Λεκάνης Απορροής (km ²)
Αλιάκμονας	297	2,000	6,400
Αχελώος	220	4,300	4,800
Πηνειός	205	2,500	9,500

2.2 Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας (EL08)

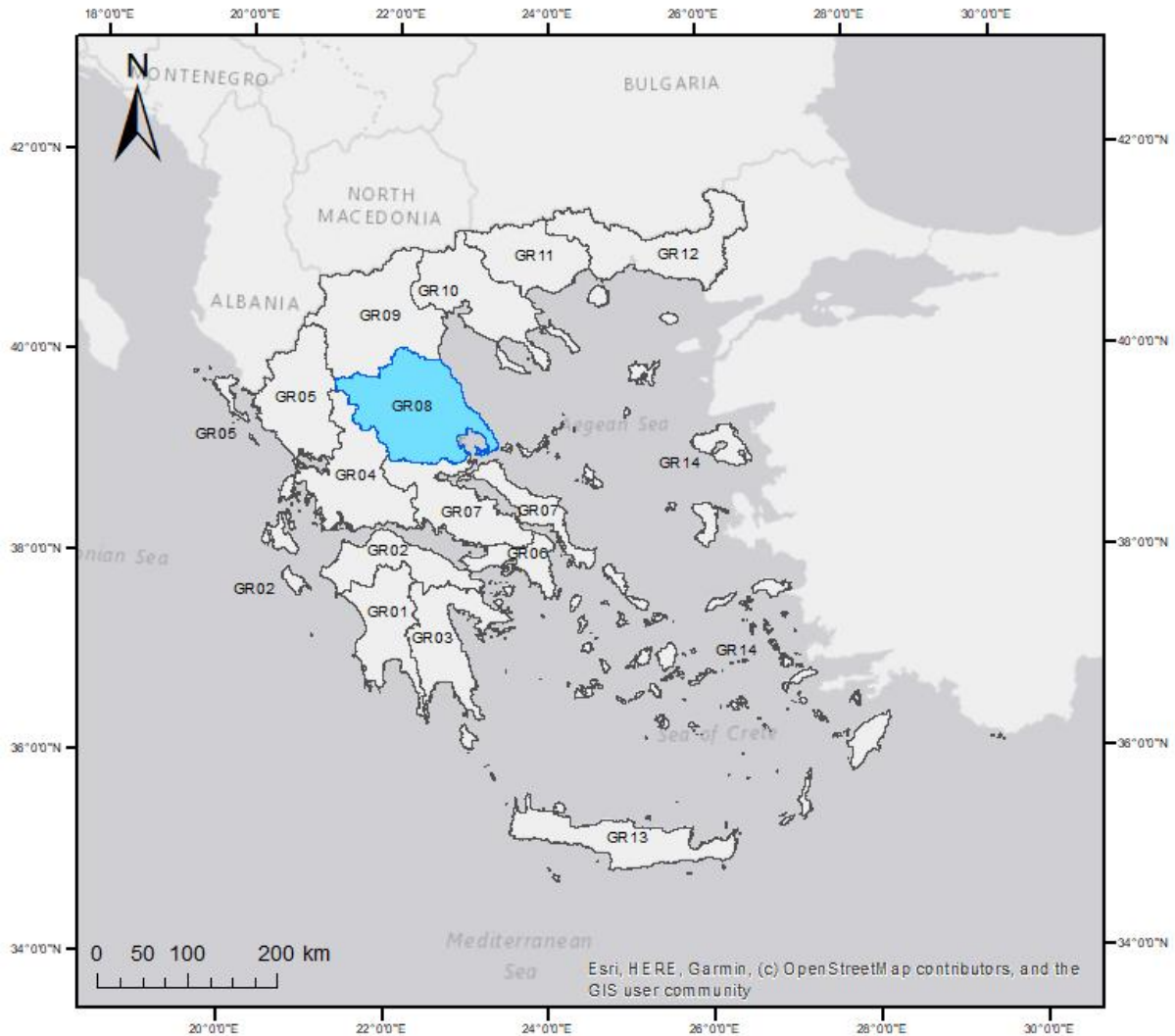
2.2.1 Γενικά στοιχεία

Με την απόφαση 706/16-7-2010 της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων, η ελληνική Επικράτεια χωρίστηκε σε 14 Υδατικά Διαμερίσματα (Πίνακας 4) και σε 46 Λεκάνες Απορροής Ποταμών (ΛΑΠ). Το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας, περιλαμβάνει το σύνολο πρακτικά της Περιφέρειας Θεσσαλίας (εκτός από τα νησιά των Σποράδων, ένα μικρό τμήμα δυτικά που ανήκει στο ΥΔ Δυτικής Στερεάς Ελλάδας (GR 04), ένα μικρό τμήμα νότια που ανήκει στο ΥΔ Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (GR 07) και ένα μικρό τμήμα βόρεια που ανήκει στο ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας (GR 09)) και το νότιο τμήμα της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας (περιοχή Πλαταμώνα). Η συνολική έκταση του ΥΔ είναι 13,377 km² και ο πληθυσμός του είναι πάνω από 700,000 κατοίκους, σύμφωνα με την απογραφή της ΕΛΣΤΑΤ για το 2011 (ΥΠΕΚΑ, 2019).

Στα βόρεια συνορεύει με το ΥΔ Δυτικής Μακεδονίας, στα δυτικά με τα ΥΔ Ηπείρου και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, στο νότιο με το ΥΔ Ανατολικής Στερεάς ενώ στα ανατολικά βρίσκεται η ακτογραμμή του με το Αιγαίο Πέλαγος. Στον Χάρτη 1 παρουσιάζεται η διαίρεση της Ελλάδας σε υδατικά διαμερίσματα καθώς και η γεωγραφική θέση του ΥΔ Θεσσαλίας.

Πίνακας 4: Τα Υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας (πηγή: ΥΠΕΚΑ)

Υδατικό Διαμέρισμα	Κωδικός	Πλήθος ΛΑΠ
Δυτικής Πελοποννήσου	GR 01	2
Βόρειας Πελοποννήσου	GR 02	3
Ανατολικής Πελοποννήσου	GR 03	3
Δυτικής Στερεάς Ελλάδας	GR 04	4
Ηπείρου	GR 05	6
Αττικής	GR 06	1
Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας	GR 07	7
Θεσσαλίας	GR 08	2
Δυτικής Μακεδονίας	GR 09	2
Κεντρικής Μακεδονίας	GR 10	4
Ανατολικής Μακεδονίας	GR 11	1
Θράκης	GR 12	5
Κρήτης	GR 13	3
Νήσων Αιγαίου	GR 14	3



Χάρτης 1: Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας (με γαλάζιο χρώμα διακρίνεται το ΥΔ Θεσσαλίας) (πηγή: <http://www.geodata.gov.gr>)

2.2.2 Κύριες Υδρολογικές Λεκάνες

Το Υδατικό Διαμέρισμα αποτελείται από δύο κύριες λεκάνες απορροής (ΥΠΕΚΑ, 2019):

- Λεκάνη Πηνειού (EL 0816)
- Λεκάνη Αλμυρού-Πηλίου (EL 0817)

Η λεκάνη απορροής του Πηνειού και των παραποτάμων του, καλύπτει την μεγαλύτερη έκταση του διαμερίσματος και φτάνει περίπου τα 11,000 km² (συμπεριλαμβανομένης και της κλειστής λεκάνης της τεχνητής λίμνης Κάρλας στα ανατολικά του ΥΔ), ενώ τα υπόλοιπα 2,000 km² αφορούν την Λεκάνη Απορροής των Ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου (Χάρτης 2).



Χάρτης 2: Δορυφορική λήψη των LAP του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (πηγή: <http://www.geodata.gov.gr>)

2.2.3 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Το ΥΔ Θεσσαλίας περιέχει το μεγαλύτερο ποσοστό πεδινών εκτάσεων από οποιοδήποτε άλλο ΥΔ της Ελλάδας. Ενδεικτικά πάνω από το 1/3 της έκτασης του είναι πεδινό ενώ σε ποσοστό περίπου 50% απαντώνται ορεινές εκτάσεις, με τις ημιορεινές να αποτελούν το υπόλοιπο ποσοστό, ενώ το μέσο υψόμετρο στο ΥΔ φτάνει τα 285 m. Στα βορειοανατολικά απαντάται ο ορεινός όγκος του Ολύμπου με μέγιστο υψόμετρο κορυφής στα 2,917 m (ψηλότερη κορυφή των Βαλκανίων). Νοτιότερα βρίσκεται ο Κάτω Όλυμπος με ψηλότερη κορυφή την Μεταμόρφωση (1,587 m) και ο Κίσαβος με κορυφή τον Προφήτη Ηλία (1,978 m). Στο νοτιοανατολικό άκρο του ΥΔ ανάμεσα στο Αιγαίο και τον Παγασητικό κόλπο βρίσκεται το Πήλιο με το μέγιστο υψόμετρο να φτάνει τα 1,551 m και στα δυτικά του ΥΔ τοποθετείται το νότιο άκρο της οροσειράς της Πίνδου φυσικό σύνορο με τα ΥΔ Δυτικής Στερεάς και Ηπείρου. Μέσα στον κλοιό που δημιουργούν οι ορεινοί αυτοί όγκοι, εκτείνεται η μεγαλύτερη πεδιάδα της Ελλάδας, η Θεσσαλική Πεδιάδα ή Θεσσαλικός Κάμπος, η οποία συνδέεται με την Μακεδονία μέσω της κοιλάδας των Τεμπών από όπου διέρχεται ο Πηνειός ποταμός. Η πεδιάδα χωρίζεται, από μια σειρά λόφων, στην πεδιάδα της Λάρισας (ανατολική) και στην πεδιάδα των Τρικάλων (δυτική). Σε όλη την έκταση της ρέει ο Πηνειός ποταμός και οι παραπόταμοι του. Λόγω των ήπιων κλίσεων τις οποίες διασχίζει η φυσική εκβάθυνση της κοίτης είναι δύσκολη, συνεπώς σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων είναι συχνό το φαινόμενο υπερχειλίσης και πλημμυρών, κάτι που προκύπτει και από το χάρτη με τις ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας κατά την «1^η

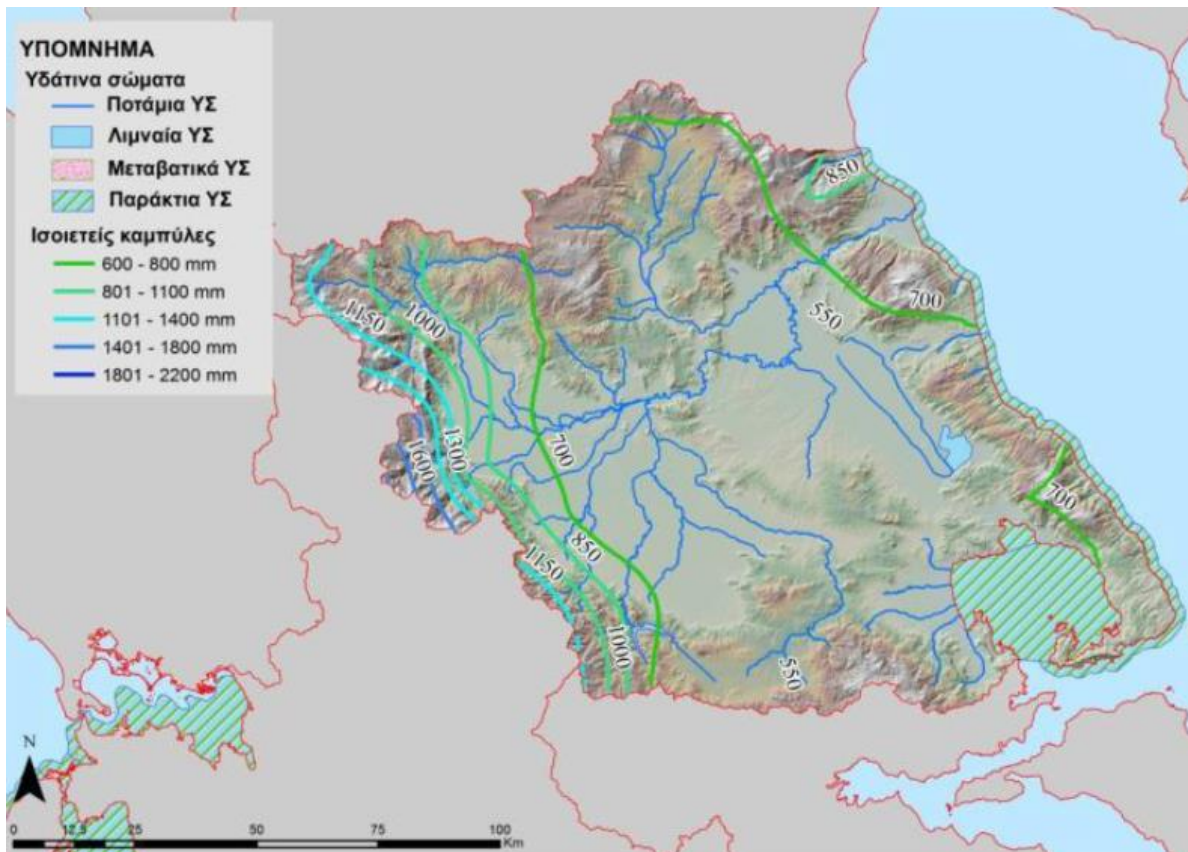
Αναθεώρηση της Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας» (Εικόνα 41 και Πίνακας 37 του παραρτήματος). Επιπλέον, στις περιοχές αυτές παρουσιάζεται έντονα το φαινόμενο του μαιανδρισμού, όπως μαρτυρά και η Εικόνα 2 (Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, 1996; ΥΠΕΚΑ, 2017).



Εικόνα 2: Πηνειός ποταμός στην ευρύτερη περιοχή της Λάρισσας (πηγή: <https://www.larissa.gov.gr>)

2.2.4 Κλιματικά χαρακτηριστικά

Το ΥΔ όσον αφορά τα κλιματολογικά του χαρακτηριστικά χωρίζεται σε τρεις περιοχές. Οι πεδινές και ημιορεινές περιοχές (κεντρικό τμήμα), έχουν κλίμα ηπειρωτικό, ενώ τα ορεινά και οι ανατολικές παραθαλάσσιες περιοχές χαρακτηρίζονται από ορεινό και μεσογειακό κλίμα αντίστοιχα. Οι χειμώνες είναι ψυχροί και τα καλοκαίρια θερμά με μεγάλες θερμομετρικές διαφορές εντός του έτους. Στα ορεινά δυτικά τον χειμώνα παρατηρούνται πολλές χιονοπτώσεις, ενώ χαρακτηριστικό του κλίματος της Θεσσαλικής πεδιάδας είναι οι συχνές θερινές καταιγίδες. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται στους 16-17°C, με θερμότερους μήνες τον Ιούλιο και τον Αύγουστο και ψυχρότερη περίοδο αυτήν Δεκεμβρίου-Φεβρουαρίου. Τα κατακρημνίσματα της περιοχής είναι σχετικά μεγάλα στο δυτικό και ανατολικό ορεινό τμήμα με μία μείωση στο κεντρικό πεδινό. Οι βροχερότεροι μήνες είναι από τον Οκτώβριο μέχρι τον Ιανουάριο ενώ οι πιο ξεροί ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής για το σύνολο του υδατικού διαμερίσματος φτάνει τα 678 mm. Στην Εικόνα 3 δίνονται οι ισοϋέτιες καμπύλες του ΥΔ (Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, 1996; ΥΠΕΚΑ, 2017).



Εικόνα 3: Χωρική κατανομή ύψους βροχής στο ΥΔ Θεσσαλίας (πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2017)

2.2.5 Γεωλογία

Στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας αναπτύσσονται σημαντικοί προσχωματικοί υδροφορείς, αλλά και μεγάλες καρστικές υδρογεωλογικές ενότητες. Όσον αφορά στην πρώτη κατηγορία υδροφορέων, η πεδιάδα της Θεσσαλίας διαχωρίζεται σε δύο κύριες υδρογεωλογικές λεκάνες, της δυτικής και της ανατολικής Θεσσαλίας. Οι δύο λεκάνες διαχωρίζονται από μία λοφώδη περιοχή νεογενών αποθέσεων, που θεωρείται ξεχωριστή υδρογεωλογική ενότητα. Στα ορεινά και ημιορεινά τμήματα το έδαφος αποτελείται από νεογενείς σχηματισμούς όπως κροκαλοπαγή και ψαμμίτες. Η γεωλογική κατάσταση ευνοεί την ύπαρξη πλούσιων υπόγειων υδροφορέων στο πεδινό τμήμα αλλά και περιμετρικά αυτού στα καρστικά συστήματα που είναι ανεπτυγμένα. Στην υπολεκάνη της Καλαμπάκας η παρουσία αργιλικών στρωμάτων δημιουργεί υδροφορείς υπό πίεση ενώ στην περιοχή των Τρικάλων οι εναλλαγές αδρομερών και λεπτόκοκκων υλικών δημιουργούν επάλληλους υπό πίεση ορίζοντες (Κουτσογιάννης κ.α., 2008; ΥΠΕΚΑ, 2017).

Στο παράρτημα παρατίθεται και ένας υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής όπως εμφανίζεται στην «1^η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (EL08)» (Εικόνα 42).

2.2.6 Διοίκηση

Από διοικητικής πλευράς το Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας περιλαμβάνει την Περιφερειακή Ενότητα Λάρισας, σχεδόν στο σύνολό της, πολύ μεγάλο μέρος των Περιφερειακών Ενοτήτων Μαγνησίας, Τρικάλων και Καρδίτσας, και μικρά τμήματα των Π.Ε. Πιερίας, Γρεβενών και Φθιώτιδας. Στον Πίνακα 5 φαίνεται η ποσοστιαία συμβολή κάθε Περιφερειακής Ενότητας στο ΥΔ καθώς και ο αντίστοιχος πληθυσμός (κατά την απογραφή του 2001). Στον Χάρτη 3 φαίνεται η διοικητική διαίρεση

καθώς και τα όρια του ΥΔ και της Περιφέρειας. Από διαχειριστικής άποψης το Διαμέρισμα υπάγεται στην Αποκεντρωμένη Διοίκηση Θεσσαλίας – Στερεάς Ελλάδας (ΥΠΕΚΑ, 2019).

Αρμόδιες για τη διαχείριση και προστασία των υδατικών πόρων των λεκανών απορροής του διαμερίσματος είναι οι Διευθύνσεις Υδάτων των περιφερειών Θεσσαλίας (με έδρα τη Λάρισα), Κεντρικής Μακεδονίας (με έδρα τη Θεσσαλονίκη), Στερεάς Ελλάδας (με έδρα τη Λαμία) και Δυτικής Μακεδονίας (με έδρα την Κοζάνη) (Κουτσογιάννης κ.α., 2008).

Πίνακας 5: (πηγή: Κουτσογιάννης κ.α., 2008)

Περιφερειακή Ενότητα	Έκταση που ανήκει στο ΥΔ Θεσσαλίας (km ²)	Ποσοστό έκτασης που ανήκει στο ΥΔ Θεσσαλίας	Πληθυσμός που ανήκει στο ΥΔ Θεσσαλίας (2001)
Λάρισα	5,283	98%	279,305
Μαγνησία	2,242	85%	190,642
Τρίκαλα	2,667	79%	133,215
Καρδίτσα	2,163	82%	121,380
Πιερία	113	7%	4,934
Γρεβενά	167	7%	5,237
Φθιώτιδα	742	17%	15,732
Άθροισμα	13,377		750,445



Χάρτης 3: Διαίρεση ΥΔ και Περιφέρειας Θεσσαλίας σε Περιφερειακές Ενότητες (πηγή: <http://www.geodata.gov.gr>)

2.2.7 Χρήσεις γης και οικονομικά στοιχεία

Η οικονομία της περιοχής στηρίζεται κυρίως στην αγροτική παραγωγή, την κτηνοτροφία και την ανάπτυξη της βιομηχανίας. Ειδικότερα, η Περιφερειακή Ενότητα Λάρισας διαθέτει την μεγαλύτερη αγροτική οικονομία της Ελλάδας. Οι γεωργικές εκτάσεις ξεπερνούν τα 5 εκατομμύρια στρέμματα, ενώ σημαντική είναι και η συνεισφορά της κτηνοτροφίας με τους βοσκότοπους να καταλαμβάνουν περίπου 4 εκατομμύρια στρέμματα γης. Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται οι χρήσεις γης για τις δύο λεκάνες απορροής του ΥΔ σύμφωνα με στοιχεία του ΟΠΕΚΕΠΕ του έτους 2015. Επίσης στους Πίνακες 7 και 8 φαίνονται οι εκτιμώμενες εκτάσεις καλλιέργειας και το μέγεθος της κτηνοτροφικής παραγωγής.

Πίνακας 6: Χρήσεις γης στο ΥΔ Θεσσαλίας ανά Λεκάνη Απορροής (πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2017)

Χρήσεις Γης	ΛΑΠ Πηνειού (ΕΙ0816)	ΛΑΠ Ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου (ΕΙ0817)
Αστικές	<1%	<1%
Βοσκότοποι	23%	11%
Καλλιέργειες	45%	34%
Δάσος	27%	52%
Δρόμοι/Υδατα	5%	2%

Πίνακας 7: Καλλιεργούμενες εκτάσεις Θεσσαλίας (πηγή: Γκούμας Υ.ΠΕ.ΘΕ., 2011)

Καλλιέργειες	Έκταση (στρέμματα)	Ποσοστό (%)
Χειμερινά Σιτηρά	2,332,432	45.41
Αραβόσιτος	187,520	3.69
Όσπρια	20,005	0.4
Βαμβάκι	1,316,230	25.94
Τεύτλα-Βιομηχανική Τομάτα	161,064	3.17
Κτηνοτροφικά Φυτά	206,010	4.06
Μποστανικά-Πατάτα-Κηπευτικά	334,008	6.58
Δένδρα	510,400	10.06
Αμπέλια	68,579	1.35
Σύνολο Καλλιεργειών	5,136,248	100
Αγρανάπαυση	224,452	
Συνολική Γεωργική Γη	5,360,700	
Αρδευόμενες Εκτάσεις	2,424,000	45.21

Πίνακας 8: Αριθμός κύριων ζώων κτηνοτροφίας Περιφέρειας Θεσσαλίας (πηγή: Επιχειρησιακό Σχέδιο Περιφέρειας Θεσσαλίας, 2011)

Ζώα	Αριθμός
Πουλερικά	1,265,900
Πρόβατα	1,171,688
Κατσίκες	449,759
Βοοειδή	119,347
Χοίροι	26,530

2.2.8 Ανάγκες και χρήσεις νερού

Οι απολήψεις νερού από τα υδάτινα συστήματα εντός του ΥΔ πραγματοποιούνται για την κάλυψη των εξής αναγκών:

- Ύδρευση
- Άρδευση
- Κτηνοτροφία
- Βιομηχανία
- Παραγωγή Ενέργειας

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζεται η συνολική ζήτηση σε νερό για κάθε χρήση, και στους Πίνακες 10-12 φαίνονται αναλυτικά οι ζητήσεις για κάθε Περιφερειακή Ενότητα εντός του ΥΔ, σύμφωνα με το Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων (Κουτσογιάννης κ.α., 2008).

Πίνακας 9: Κατανομή ζήτησης ανά χρήση ύδατος (πηγή: Υ.ΠΕ.ΘΕ.)

Χρήση Ύδατος	Ετήσια Εκτιμώμενη Απόληψη (hm ³)
Άρδευση	1,550
Ύδρευση	69
Κτηνοτροφία	13
Βιομηχανία	9

Πίνακας 10: Εκτίμηση αρδευτικής ζήτησης στις ΠΕ του ΥΔ με βάση το σύνολο των δυνάμενων να αρδευτούν εκτάσεων (πηγή: ΕΣΥΕ, 1995)

Περιφερειακή Ενότητα	Αρδευτική Ζήτηση (hm ³ /έτος)
Λάρισας	632.7
Μαγνησίας	105.8
Τρικάλων	289.7
Καρδίτσας	510.1
Πιερίας	1.4
Γρεβενών	0.7
Φθιώτιδας	28.3
Σύνολο	1,568.7

Πίνακας 11: Εκτίμηση ζήτησης νερού για κτηνοτροφία στις ΠΕ του ΥΔ (πηγή: ΕΣΥΕ, 1995)

Περιφερειακή Ενότητα	Κτηνοτροφική Ζήτηση (hm ³ /έτος)
Λάρισας	5.5
Μαγνησίας	1.7
Τρικάλων	2.4
Καρδίτσας	1.7
Πιερίας	0.1
Γρεβενών	0.1
Φθιώτιδας	0.3
Σύνολο	11.8

Πίνακας 12: Εκτίμηση ζήτησης για ύδρευση στις ΠΕ του ΥΔ (πηγή: Κουτσογιάννης κ.α., 2008; Μαμάσης κ.α., 2006)

Περιφερειακή Ενότητα	Ανάγκες Ύδρευσης (hm ³ /έτος)
Λάρισας	10.7
Μαγνησίας	7.31
Τρικάλων	5.11
Καρδίτσας	4.65
Πιερίας	0.19
Γρεβενών	0.2
Φθιώτιδας	0.6
Σύνολο	68.48

Για την ικανοποίηση των αναγκών, κυρίως όσον αφορά την άρδευση, έχουν γίνει έργα, όπως εκτροπές ποταμών δημιουργία ταμιευτήρων και μικρών φραγμάτων αλλά και γεωτρήσεις. Στο ΥΔ ωστόσο παρατηρείται έλλειμμα στο ισοζύγιο προσφοράς-ζήτησης νερού λαμβάνοντας υπόψιν και τις ανάγκες αποκατάστασης των υπόγειων και επιφανειακών υδάτινων συστημάτων τα οποία για δεκαετίες είχαν υπερεκμεταλλευθεί (Υ.ΠΕ.ΘΕ., 2021). Ενδεικτικά για το έτος 2017 οι ανάγκες νερού στο ΥΔ ήταν 1,425 hm³ ενώ οι διαθέσιμες ποσότητες νερού κατά το ίδιο έτος έφτασαν μόλις τα 780 hm³, οδηγώντας έτσι το ετήσιο ισοζύγιο σε ένα έλλειμμα της τάξης του 45%. Για το ίδιο έτος οι ανάγκες καλύφθηκαν κατά το 1/3 από τα επιφανειακά νερά της λεκάνης του Πηνειού και κατά 7% από την εκτροπή των νερών της λεκάνης του Αχελώου (Λίμνη Πλαστήρα). Τα υπόλοιπα 2/3 των αναγκών, δηλαδή περίπου 945 hm³ προήλθαν από την άντληση υπόγειων υδάτων μέσω γεωτρήσεων. Το ετήσιο έλλειμμα του υπόγειου υδροφορέα φτάνει τα 325 hm³, ενώ κατά την περίοδο 1980-2010 το έλλειμμα συνολικά έφτασε τα 3000 hm³ (Γκούμας, 2021).

Το γεγονός την υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων αποτελεί αποτέλεσμα των πολλών γεωτρήσεων που λειτουργούν εντός του ΥΔ. Το 1972 ξεκίνησε το έργο αξιοποίησης των υπόγειων υδροφορέων της Θεσσαλίας με τίτλο «Πρόγραμμα Ανάπτυξης Υπόγειων Υδάτων Θεσσαλίας» ή ΠΑΥΥΘ. Στον Πίνακα 13 παρουσιάζεται μία εκτίμηση του υπόγειου υδατικού δυναμικού σε διάφορες περιοχές εντός του ΥΔ. Μέχρι το 1986 έγινε η ανόρυξη 1,427 γεωτρήσεων για κάθε χρήση (ερευνητικές, πιεζομετρικές, εκμετάλλευσης), κατασκευάστηκαν υπόγεια αρδευτικά δίκτυα έκτασης 40,600 στρεμμάτων, επιφανειακά έργα άρδευσης καθώς και αποστραγγιστικά και αποχετευτικά συστήματα. Τα σημαντικότερα έργα που λειτουργούν σήμερα με γεωτρήσεις για αρδευτική χρήση είναι τα εξής:

- Αρδευτικό ΠΑΥΥΘ Λάρισας έκτασης 125 km²
- Αρδευτικό ΠΑΥΥΘ Τρικάλων έκτασης 120 km²
- Αρδευτικό ΠΑΥΥΘ Θεσσαλιώτιδας έκτασης 52 km²

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 ξεκίνησε η κατασκευή μικρής κλίμακας έργων αξιοποίησης των επιφανειακών υδάτων. Έχουν κατασκευαστεί 13 πεδινού ταμιευτήρες που εξυπηρετούν μέχρι και 60,000 στρέμματα καλλιεργειών καθώς και 85 μόνιμα και 60 πρόχειρα φράγματα και λιμνοδεξαμενές. Στην Εικόνα 43 του παραρτήματος παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια από τα σημαντικότερα έργα διαχείρισης νερού του ΥΔ Θεσσαλίας.

Πίνακας 13: Εκτίμηση υπόγειου υδατικού δυναμικού (πήγη: Μελισσάρης, 1990)

Λεκάνες	Ετήσιο υδατικό δυναμικό (hm ³)
Δυτική Πεδιάδα	
Τρικάλων	46.6
Λυγαριάς	13.2
Μ. Καλυβίων	53.9
Σελλάνων	69.1
Πηνειού	23.8
Καλλίθηρου	3.7
Ματαράγκας - Ορφανών	14.6
Θεσσαλιώτιδας	46.3
Φαρσάλων	46.3
Υπόλοιπο δυτικής πεδιάδας	67.0
Σύνολο δυτικής πεδιάδας	384.6
Ανατολική Πεδιάδα	
Δαμάσιου	2.7
Τυρνάβου	75.3
Χάλκης	7.0
Βορειανατολικού ορίου	1.1
Στεφασοβικίου	9.7
Υπόλοιπης ανατολικής πεδιάδας	25.6
Σύνολο ανατολικής πεδιάδας	121.4
Κάρλας	5.0
Αλμυρού	70.0
Δυτικού Πηλίου	6.0
Ανατολικού Πηλίου	2.0
Σύνολο υδατικού διαμερίσματος	589.0

2.2.9 Υδατικά συστήματα

Σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ (Άρθρο 2, Παράγραφος 1) ο χαρακτηρισμός των επιφανειακών υδάτων στοχεύει αρχικά στην αναγνώριση των επιφανειακών υδατικών συστημάτων και την κατάταξη τους σε 4 κατηγορίες:

- Ποταμοί: Συστήματα εσωτερικών υδάτων τα οποία ρέουν κυρίως στην επιφάνεια του εδάφους αλλά και υπόγεια.
- Λίμνες: Συστήματα στάσιμων εσωτερικών υδάτων
- Μεταβατικά Ύδατα: Συστήματα επιφανειακών υδάτων κοντά στις εκβολές των ποταμών τα οποία περιέχουν αλμυρό νερό αλλά επηρεάζονται από ρεύματα γλυκού νερού.
- Παράκτια: Τα επιφανειακά ύδατα που βρίσκονται σε απόσταση μέχρι ενός ναυτικού μιλίου από την θάλασσα.

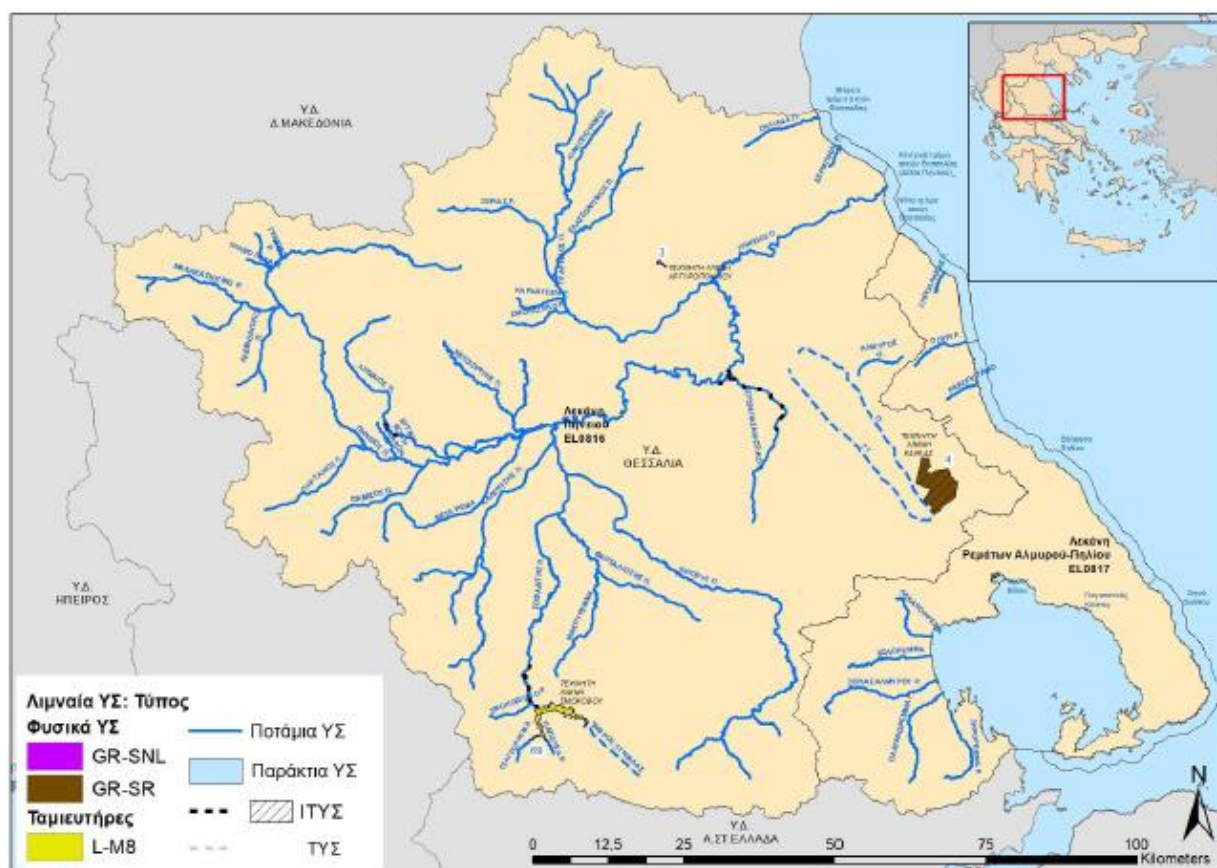
Εκτός από την παραπάνω κατηγοριοποίηση σημαντικό είναι να καθοριστεί η ανθρώπινη παρέμβαση στα υδατικά συστήματα. Ανάλογα με το εύρος της παρέμβασης αυτά χωρίζονται σε 3 κατηγορίες:

- Φυσικά υδατικά συστήματα
- Τεχνητά υδατικά συστήματα (ΤΥΣ)
- Ιδιαίτερος τροποποιημένα υδατικά συστήματα (ΙΤΥΣ)

Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται τα ΥΣ του ΥΔ και η κατανομή τους στις δύο λεκάνες και στην Εικόνα 4 παρατίθεται αντίστοιχος χάρτης με τα εν λόγω Υδάτινα Συστήματα.

Πίνακας 14: Υδατικά συστήματα ΥΔ Θεσσαλίας (πηγή: Υ.Π.Ε.Κ.Α, 2017)

Τύπος ΥΣ	ΛΑΠ Πηνειού (ΕΛ0816)	ΛΑΠ Ρεμάτων Αλμυρού-Πηλίου (ΕΛ0817)	Συνολικό ΥΔ
Ποτάμια ΥΣ	64	8	72
Ποτάμια ΙΤΥΣ Λιμναίου Χαρακτήρα (Ταμειυτήρες)	1	-	1
Λιμναία ΥΣ	2	-	2
Μεταβατικά ΥΣ	-	-	-
Παράκτια ΥΣ	2	5	7



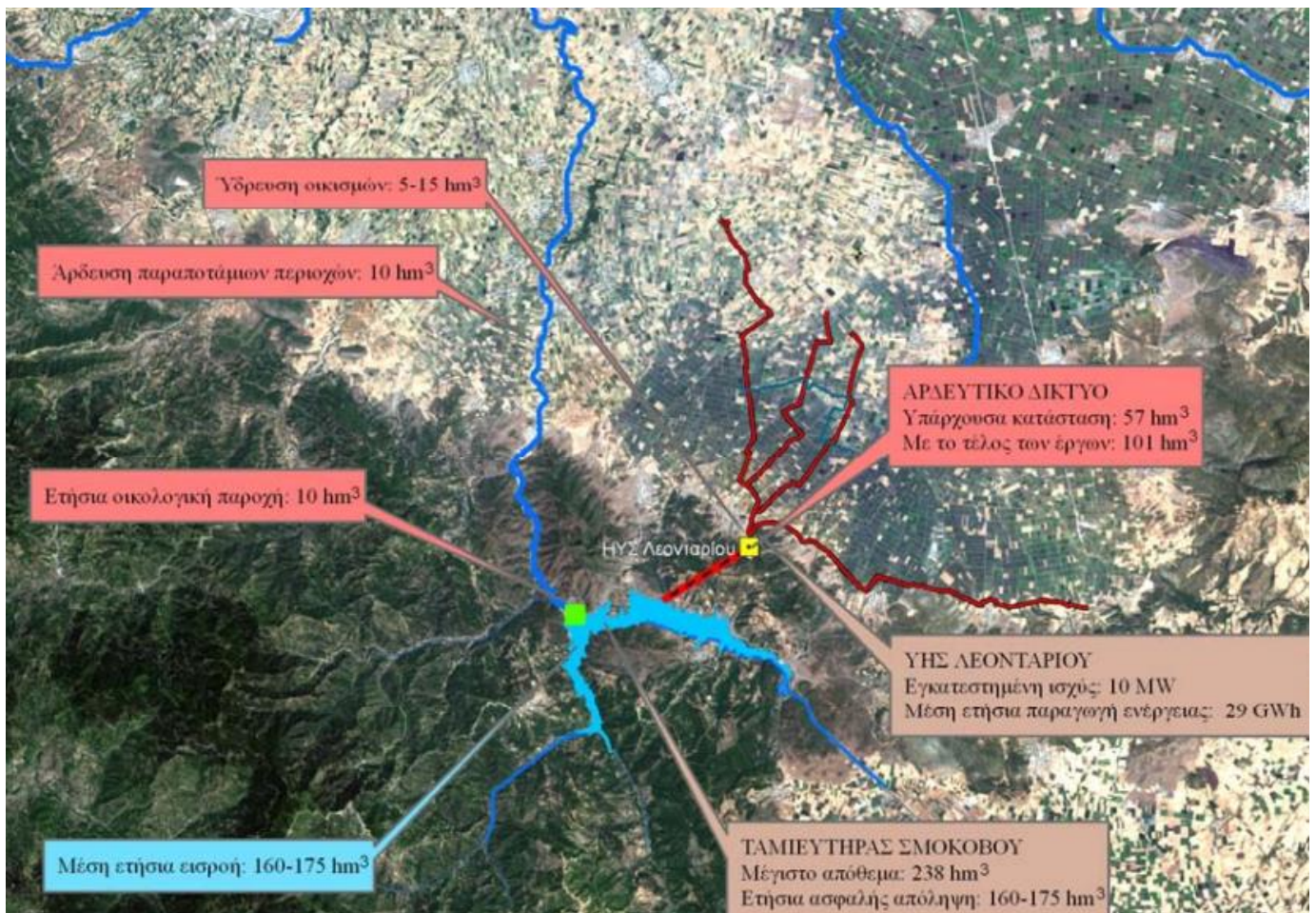
Εικόνα 4: Τυπολογία ποτάμιων ΙΤΥΣ λιμναίου χαρακτήρα και λιμναίων ΥΣ ΥΔ Θεσσαλίας (πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2017)

2.2.10 Ενεργειακή παραγωγή

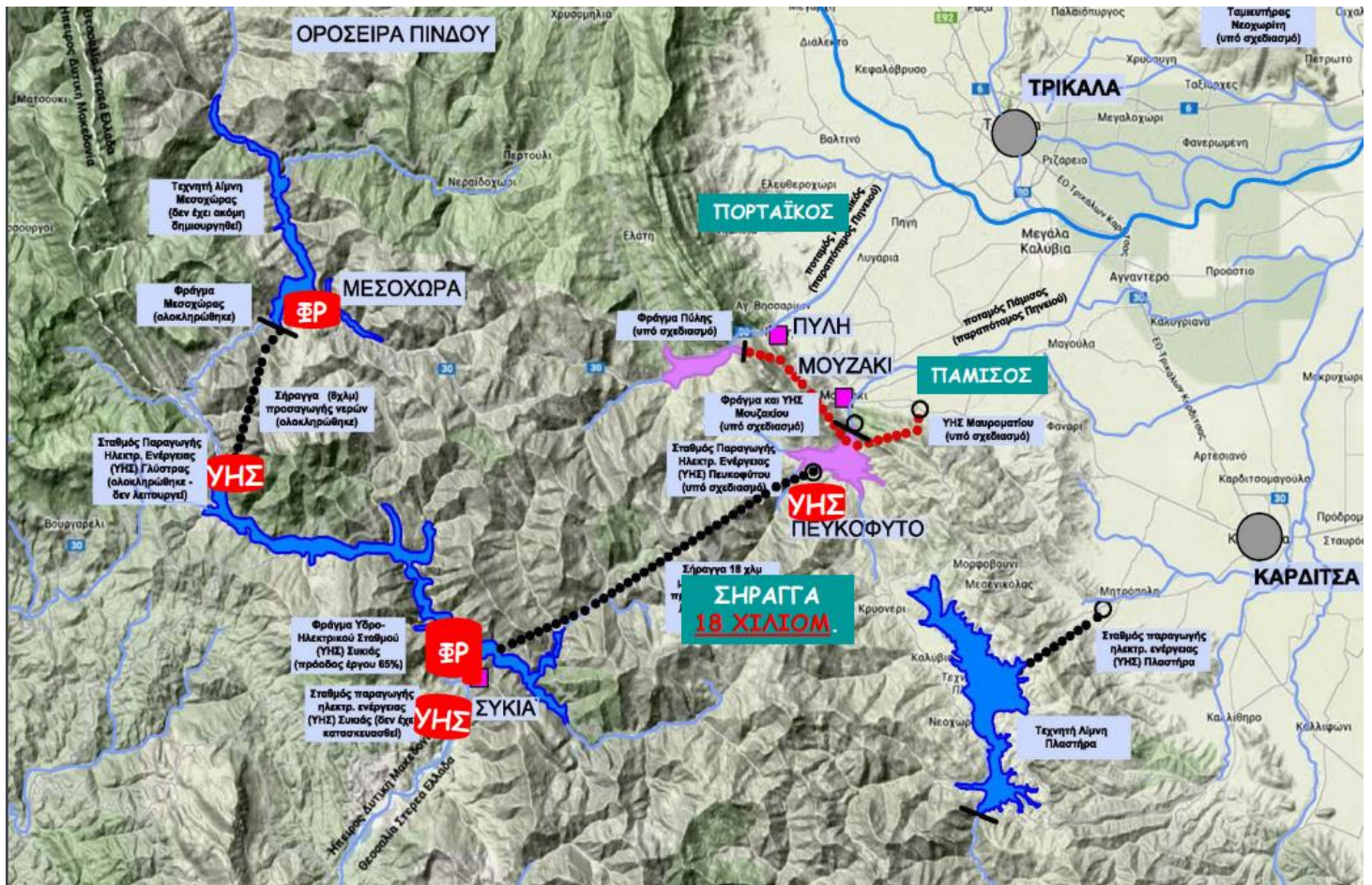
Η περιοχή ενώ διαθέτει μεγάλο υδατικό δυναμικό, αυτό δεν αξιοποιείται μέχρι σήμερα σε μεγάλο βαθμό για την παραγωγή ενέργειας. Το πιο σημαντικό έργο παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας είναι ο υδροηλεκτρικός σταθμός στη λίμνη Πλαστήρα (Ταυρωπού). Πρόκειται για έργο πολλαπλού σκοπού. Το φράγμα και η λίμνη βρίσκονται στη λεκάνη απορροής του Αχελώου και αξιοποιούν τους υδατικούς της πόρους, ενώ ο υδροηλεκτρικός σταθμός και το αρδευτικό έργο βρίσκονται στην λεκάνη του Πηνειού. Το νερό χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας (έως και 220 GWh ετησίως), αλλά και για την ύδρευση και άρδευση κυρίως στην ΠΕ Καρδίτσας. Ωστόσο, για την στήριξη της αρδευτικής

ζήτησης ο χαρακτήρας του έργου Πλαστήρα έχει αλλάξει από ενεργειακό σε αρδευτικό. Ακόμα ένα υδροηλεκτρικό έργο, μικρότερης κλίμακας είναι εγκατεστημένο στον Ταμιευτήρα του Σμοκόβου (υδροηλεκτρικός σταθμός Λεονταρίου) με εγκατεστημένη ισχύ 10 MW και μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας 29 GWh.

Σημαντικό έργο θεωρείται η εκτροπή τμήματος του Αχελώου ποταμού από το ΥΔ Δυτικής Στερεάς σε αυτό της Θεσσαλίας για την κάλυψη των αναγκών σε νερό σε συνδυασμό με την κατασκευή μικρών υδροηλεκτρικών έργων στην περιοχή του Πευκόφυτου, του Μουζακίου και του Μαυροματίου. Το έργο αυτό ωστόσο δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα (Κουτσογιάννης κ.α., 2008). Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται δορυφορική λήψη της τεχνητής λίμνης του Σμοκόβου καθώς και τα μεγέθη για κάθε χρήση, ενώ στην Εικόνα 6 φαίνονται τα υπό κατασκευή έργα εκτροπής του Αχελώου και η συνεισφορά της λίμνης Πλαστήρα στο υδατικό ισοζύγιο.



Εικόνα 5: Δορυφορική λήψη υδροσυστήματος Σμοκόβου (πηγή: Κουτσογιάννης κ.α., 2007)



Εικόνα 6: Έργα διαχείρισης υδάτων άνω Αχελώου (πηγή: ΥΠΕΘΕ, 2014)

2.3 Συλλογή Δεδομένων

Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση είναι τα γεωχωρικά στοιχεία της περιοχής και τα υδρομετεωρολογικά στοιχεία των κοντινών σταθμών. Λόγω της μεγάλης έκτασης και του πλούσιου υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης του Πηνειού η παρούσα εργασία περιορίζεται στην ανάλυση της λεκάνης ανάντη και δυτικά της πόλης των Τρικάλων.

2.3.1 Γεωχωρικά Δεδομένα

Τα γεωχωρικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη αποτελούνται από τους εξής τρεις χάρτες:

- Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) ή Digital Earth Model (DEM)
- Χάρτης Κάλυψης Γης ή Land Cover Map
- Εδαφολογικός Χάρτης ή Soil Map

Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους: Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι ο βασικός χάρτης πάνω στον οποίο καταρτίζεται μία υδρολογική μελέτη. Αποτελεί ψηφιοποίηση της γεωμορφολογίας του εδάφους και χρησιμοποιείται συνήθως σε μορφή raster αρχείου. Αποτελείται δηλαδή από εικονοστοιχεία (pixels) δεδομένων διαστάσεων κάθε ένα από τα οποία παίρνει μία τιμή υψομέτρου. Το DEM της παρούσας εργασίας λαμβάνεται από την ευρωπαϊκή υπηρεσία “Copernicus Land Monitoring Service” για όλη την Ευρώπη. Η ακρίβεια του dem είναι 25 m, η οποία θεωρείται επαρκής για την υδρολογική ανάλυση.

Χάρτης Κάλυψης Γης: Στόχος του χάρτη κάλυψης γης είναι ο εντοπισμός των διάφορων εκτάσεων που υπάρχουν μέσα σε μία λεκάνη απορροής. Αυτές οι εκτάσεις μπορεί να είναι ένας αστικός ιστός, ένα δάσος, μία καλλιέργεια και πολλά άλλα. Κάθε τύπος έχει διαφορετικές ιδιότητες όσον αφορά την απορροή των κατακρημνισμάτων. Ένας τέτοιος χάρτης είναι συνήθως σε μορφή shapefile. Δηλαδή, σε αντίθεση με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, σε αυτήν την περίπτωση η συνολική λεκάνη χωρίζεται σε πολύγωνα που το καθένα αντιπροσωπεύει και μία διαφορετική κάλυψη γης. Ο ζητούμενος χάρτης για την περιοχή μελέτης λαμβάνεται από την ευρωπαϊκή υπηρεσία “Copernicus Land Monitoring Service, Corine Land Cover 2018” για όλη την Ευρώπη. Πολλές φορές η έννοια της κάλυψη γης ταυτίζεται με αυτή της χρήσης γης. Στην συνέχεια του κειμένου ο όρος προσεγγίζεται ως χρήσεις γης καθώς έτσι ορίζεται και στο πρόγραμμα του SWAT (SWAT Land Use).

Εδαφολογικός Χάρτης: Ο εδαφολογικός χάρτης περιέχει σημαντικές πληροφορίες που αφορούν το έδαφος και το υπέδαφος. Από υδρολογικής σκοπιάς η γνώση του εδαφικού σχηματισμού της περιοχής μελέτης είναι σημαντική καθώς επηρεάζει συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου όπως η διήθηση και τα υπόγεια νερά. Σε συνδυασμό με την μορφολογία και τις χρήσεις γης είναι τα τρία βασικά στοιχεία που επηρεάζουν την απόκριση μίας λεκάνης. Η μορφή του αρχείου είναι όμοια με αυτή των χρήσεων γης (αρχείο shapefile), καθώς χωρίζει την περιοχή σε πολύγωνα ανάλογα με τον τύπο του εδάφους. Ο χάρτης λαμβάνεται από τον παγκόσμιο οργανισμό “Food and Agriculture Organization of the United Nations” για όλο τον κόσμο.

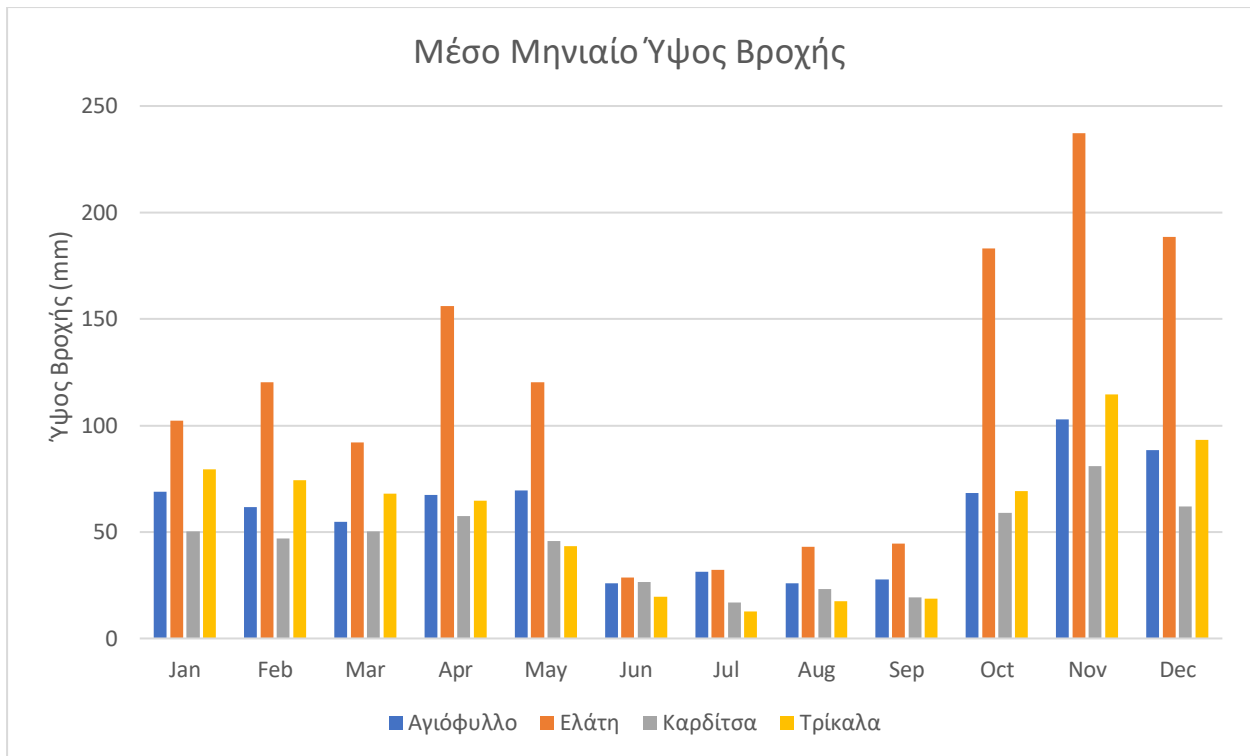
2.3.2 Υδρομετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση είναι το ύψος βροχής και οι ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες σε ημερήσιο βήμα. Στην Ελλάδα υπάρχουν διάφοροι οργανισμοί που διαθέτουν δίκτυα σταθμών σε όλη τη χώρα. Τα σημαντικότερα παραδείγματα αυτών είναι η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY), το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (ΕΑΑ) και το Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ). Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται σε πολλές περιοχές της χώρας όπως και στην περιοχή μελέτης, είναι η έλλειψη δεδομένων, είτε αυτό αφορά κενά μετρήσεων, είτε χρονοσειρές μικρού μήκους.

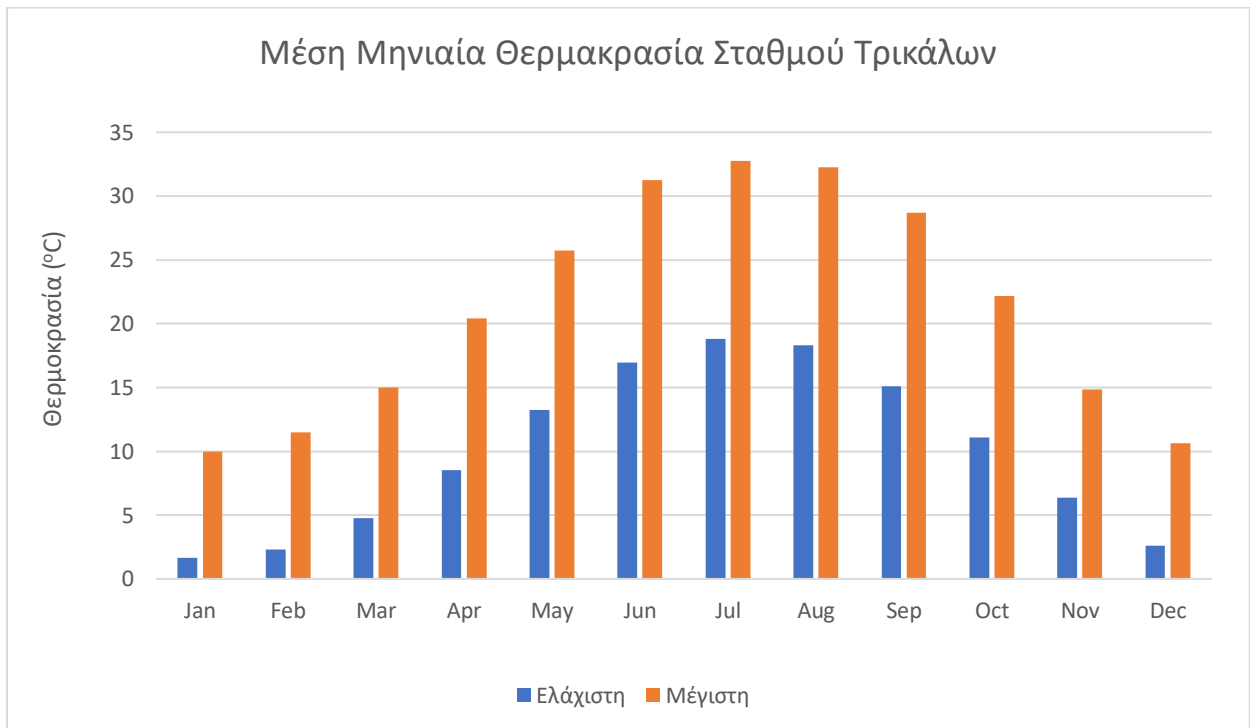
Κατά την πορεία της εργασίας αναλύθηκαν τα δεδομένα πολλών σταθμών και με βάση τον αριθμό ελλείψεων δεδομένων αλλά και την μέγιστη διαθέσιμη περίοδο επικαλυπτόμενης χρονοσειράς, επιλέχθηκαν οι παρακάτω σταθμοί για την τελική ανάλυση που παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 15). Η τελική χρονοσειρά των δεδομένων περιορίζεται από την 1^η Ιανουαρίου του 1984 μέχρι την 31^η Δεκεμβρίου του 2001. Στις Εικόνες 7,8 δίνονται οι μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για τους σταθμούς του πίνακα ενώ στο παράρτημα, στις Εικόνες 44-48, παρουσιάζονται αναλυτικότερα διαγράμματα για τον κάθε σταθμό ξεχωριστά.

Πίνακας 15: Δίκτυο σταθμών που χρησιμοποιήθηκε για την υδρολογική προσομοίωση (Πηγή: EMY, www.hydroscope.gr)

Σταθμός - Υπηρεσία	Γεωγραφικό Πλάτος (μοίρες)	Γεωγραφικό Μήκος (μοίρες)	Υψόμετρο (m)	Διαθέσιμα Δεδομένα
Τρίκαλα (EMY)	39.53	21.76	109	Ύψος βροχής, Θερμοκρασία
Καρδίτσα (ΥΠΕΚΑ)	39.37	21.93	107	Ύψος βροχής
Αγιόφυλλο (ΥΠΕΚΑ)	39.86	21.56	584	Ύψος βροχής
Ελάτη (ΥΠΕΚΑ)	39.50	21.54	909	Ύψος βροχής



Εικόνα 7: Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής των διαθέσιμων σταθμών (πηγή: ΕΜΥ, <http://www.hydroscope.gr>)



Εικόνα 8: Μέση ελάχιστη και μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία σταθμού Τρικάλων (πηγή: ΕΜΥ)

3. Μεθοδολογία

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για την εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης της λεκάνης στο πρόγραμμα SWAT και η διαδικασία βαθμονόμησης και σύγκρισης με το πρόγραμμα LISFLOOD.

Η υδρολογική ανάλυση και προσομοίωση πραγματοποιείται με χρήση του προγράμματος ArcSWAT 2012 στο περιβάλλον του ArcGIS 10.5.1. Στην περιοχή δεν βρέθηκαν πραγματικές μετρήσεις παροχής από υδρομετρικούς σταθμούς. Έτσι για την σύγκριση των αποτελεσμάτων λαμβάνονται ως δεδομένα τα αποτελέσματα του Κοινού Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Joint Research Center ή JRC) το οποίο χρησιμοποιεί το υδρολογικό μοντέλο του προγράμματος LISFLOOD για την υδρολογική ανάλυση όλης της περιοχής που εντάσσεται στο Ευρωπαϊκό σύστημα προειδοποίησης για τις πλημμύρες (European Flood Awareness System ή EFAS). Τέλος, γίνεται μία σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων με την βοήθεια εκτιμήσεων των μέσων ετήσιων παροχών σε 4 υπολεκάνες της περιοχής.

3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο μοντέλων

3.1.1 SWAT

Το Soil and Water Assessment Tool ή SWAT είναι ένα υδρολογικό μοντέλο το οποίο αναπτύσσεται εδώ και πάνω 30 χρόνια από την Υπηρεσία Αγροτικών Ερευνών του Υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών (Gassman et al., 2007), με την συμβολή πολλών καθηγητών και πανεπιστημίων των ΗΠΑ. Πρόκειται για ένα ελεύθερο λογισμικό που διατίθεται στο κοινό μέσω της ιστοσελίδας (<https://swat.tamu.edu>) και λειτουργεί σε περιβάλλον Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS).

Το SWAT είναι ένα κατανεμημένο μοντέλο που λειτουργεί σε επίπεδο λεκανών απορροής και σε συνεχή χρόνο. Λειτουργεί με ημερήσιο βήμα υπολογισμού και είναι σχεδιασμένο να εκτιμά την μακροχρόνια επιρροή της δραστηριότητας (ανθρωπογενούς ή φυσικής) εντός της λεκάνης σε διάφορες παραμέτρους ενδιαφέροντος (Gassman et al., 2007). Το φάσμα των φυσικών διεργασιών που μπορεί να προσομοιώσει είναι μεγάλο. Εκτός από τις υδρολογικές διεργασίες που είναι το βασικό στοιχείο της ανάλυσης, μπορεί να προσομοιώσει την ανάπτυξη της βλάστησης και των καλλιεργειών, την διάβρωση του εδάφους, συνιστώσες της στερεομεταφοράς, και τέλος την μόλυνση των υδάτινων σωμάτων από την χρήση φυτοφαρμάκων και την διάθεση αποβλήτων σε αυτά (Vahid Rafiei et al., 2020).

Στο SWAT η λεκάνη απορροής χωρίζεται αρχικά σε υπολεκάνες, στις συμβολές των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, οι οποίες με την σειρά τους χωρίζονται σε Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (Hydrologic Response Units ή HRUs), οι οποίες χαρακτηρίζονται από έναν ενιαίο τύπο χρήσης γης και εδάφους και ανήκουν σε μία κατηγορία εδαφικής κλίσης. Η ανάλυση κατά την προσομοίωση χωρίζεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη αφορά την ανάλυση της απορροής στην επιφάνεια του εδάφους και η δεύτερη στην ανάλυση της διόδευσης του εντός του υδρογραφικού δικτύου (Neitsch et al., 2009).

Στην πρώτη φάση το μοντέλο υπολογίζει το υδατικό ισοζύγιο σε κάθε HRU και με αυτόν τον τρόπο συγκεντρώνει τα αποτελέσματα για κάθε υπολεκάνη, βασιζόμενο στις ιδιότητες του κάθε HRU. Η βασική εξίσωση ισοζυγίου που χρησιμοποιεί το SWAT για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου είναι η εξής (Εξίσωση 1):

$$SW_t = SW_0 \sum_{n=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E - Q_{perc} - Q_{gw}) \quad (1)$$

Όπου:

- SW_t : η τελική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό
- SW_0 : η αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στο χρονικό βήμα n
- t : το χρονικό διάστημα προσομοίωσης (d)
- R_{day} : η βροχόπτωση στο χρονικό βήμα n (mm)
- Q_{surf} : η επιφανειακή απορροή στο χρονικό βήμα n (mm)
- E : η εξατμισοδιαπνοή στο χρονικό βήμα n (mm)
- Q_{perc} : η κατείσδυση από της επιφάνεια του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη στο χρονικό βήμα n (mm)
- Q_{gw} : η επιστροφή νερού από τον φρεάτιο ορίζοντα προς το υδρογραφικό δίκτυο στο χρονικό βήμα n (mm)

Για τον υπολογισμό της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιείται η μέθοδος του Αριθμού Καμπύλης (Curve Number ή CN) της αμερικάνικης Υπηρεσίας Προστασίας του Εδάφους (Soil Conservation Service ή SCS). Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής γίνεται με τον υπολογισμό αρχικά την δυνητικής εξατμισοδιαπνοής μέσω μίας εκ των μεθόδων Penman-Monteith, Hargreaves και Priestley -Taylor. Τέλος, για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς SWAT στηρίζεται στην μέθοδο M_{USLE} (Modified Universal Soil Loss Equation) και χρησιμοποιεί τον παρακάτω τύπο (Εξίσωση 2).

$$Sed = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (2)$$

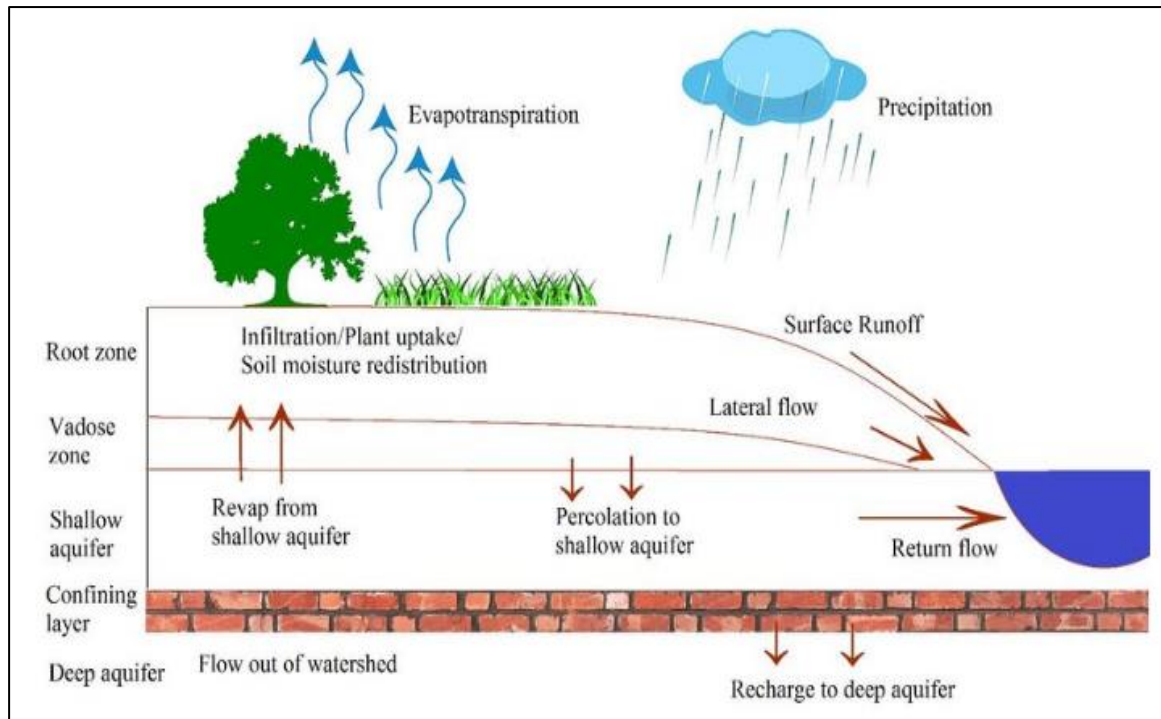
Όπου:

- Sed : η στερεομεταφορά σε μία δοσμένη μέρα (t/ha)
- Q_{surf} : η επιφανειακή απορροή (mm)
- q_{peak} : η μέγιστη τιμή της επιφανειακής παροχής (m³/s)
- $area_{hru}$: η έκταση της επιφάνειας του HRU (ha)
- $K_{USLE}, C_{USLE}, P_{USLE}, LS_{USLE}$: συντελεστές της μεθόδου M_{USLE}
- $CFRG$: ο συντελεστής τραχύτητας των κόκκων του εδάφους

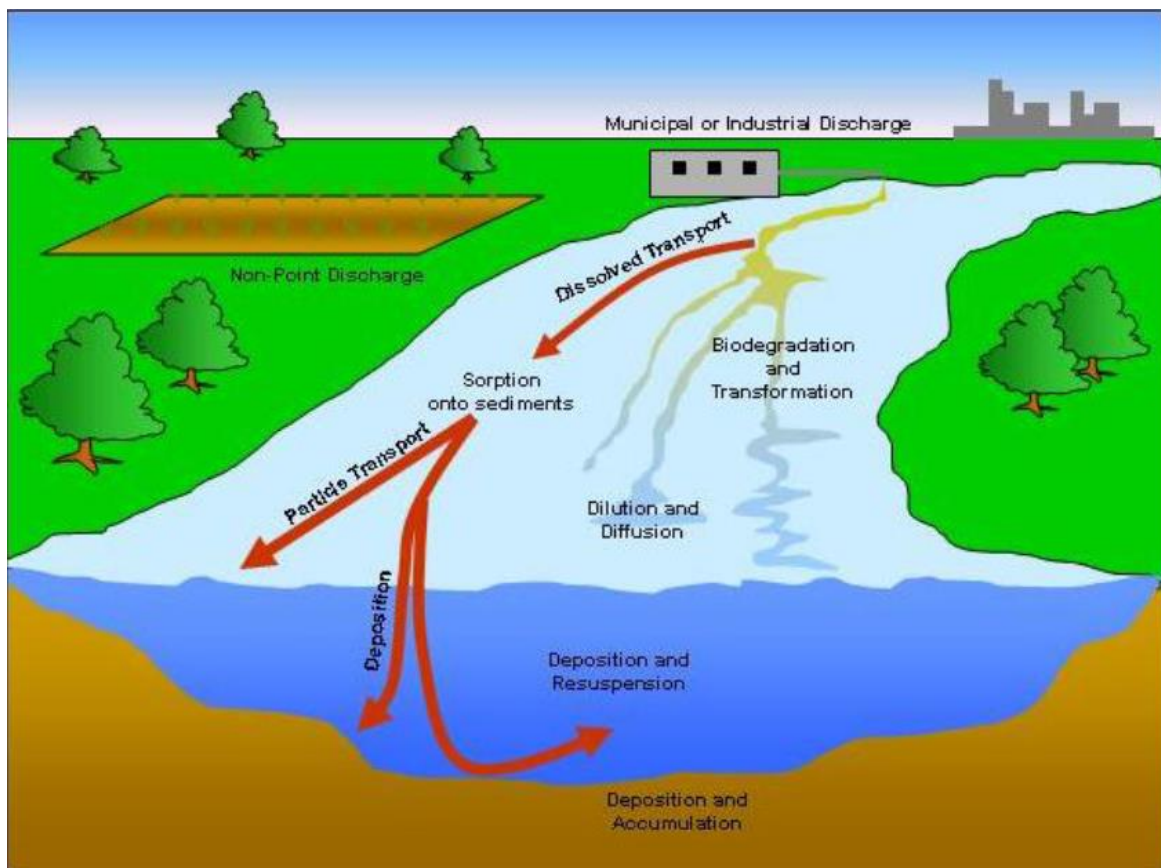
Στην δεύτερη φάση ανάλυσης (εντός του υδρογραφικού δικτύου) το SWAT διοχετεύει τα μεγέθη ροής μέσω των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου προς την έξοδο της κάθε υπολεκάνης και τελικά στην έξοδο ολόκληρης της λεκάνης απορροής. Το μοντέλο διαθέτει υδροδυναμικές εξισώσεις τις οποίες επιλύει σε κάθε βήμα για να υπολογίσει ορισμένες παραμέτρους όπως η μέγιστη συγκέντρωση στερεών, η επιρροή της ροής στην κοίτη και τις όχθες του ποταμού και οι διαβρώσεις σε αυτόν (Vahid Rafiei et al., 2020). Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στα μεγέθη ροής που προκύπτουν από την προσομοίωση και όχι σε αυτά της στερεομεταφοράς ή των χημικών.

Πέρα από τα παραπάνω στοιχεία που αφορούν τις διεργασίες υπολογισμού του μοντέλου, σημαντικό πλεονέκτημα του SWAT είναι η πληθώρα βάσεων δεδομένων που διατίθενται μαζί με το λογισμικό. Ένα μεγάλο πλήθος φυσικών και υδρολογικών παράμετροι που αφορούν την κάθε κατηγορία χρήσης γης, εδάφους και άλλων στοιχείων του μοντέλου περιέχονται σε αντίστοιχες βάσεις δεδομένων και εφαρμόζονται αυτομάτως κατά την είσοδο των δεδομένων στο πρόγραμμα.

Στην Εικόνα 9 δίνεται μία σχηματική απεικόνιση του υδρολογικού ισοζυγίου για την πρώτη φάση ανάλυσης και στην Εικόνα 10 για την δεύτερη.



Εικόνα 9: Επισκόπηση πρώτης φάσης ανάλυσης του μοντέλου SWAT (πηγή: Neitsch, 2009)



Εικόνα 10: Επισκόπηση δεύτερης φάσης προσομοίωσης ανάλυσης του μοντέλου SWAT (πηγή: Neitsch, 2009)

3.1.2 LISFLOOD

Το LISFLOOD είναι ένα υδρολογικό μοντέλο βροχής - απορροής με το οποίο είναι δυνατή η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε μία λεκάνη απορροής. Το LISFLOOD έχει αναπτυχθεί από την αρμόδια ομάδα για τις πλημμύρες στο πλαίσιο της μελέτης φυσικών κινδύνων (Natural Hazards Project) του Κοινού Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (JRC) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission). Ο στόχος της ανάπτυξης του μοντέλου ήταν η δημιουργία ενός εργαλείου το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες διακρατικές λεκάνες απορροής για διάφορες εφαρμογές και χρήσεις όπως (Burek et al., 2013):

- Πρόβλεψη πλημμυρικών επεισοδίων
- Αξιολόγηση της επίδρασης των κανονιστικών μέτρων του ποταμού
- Αξιολόγηση της επίδρασης των μεταβολών στις χρήσεις γης
- Αξιολόγηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής

Ενώ υπάρχουν μοντέλα κατάλληλα για κάθε μία από τις παραπάνω εφαρμογές στόχος της ανάπτυξης του εν λόγω μοντέλου είναι η ταυτόχρονη συνεισφορά σε όλα. Επιπλέον απαίτηση αναφορικά με το μοντέλο ήταν η χωρική κατανομή της πληροφορίας που δίνει καθώς και έως ένα βαθμό, να ακολουθούνται οι κανόνες της φυσικής που διέπουν τις προσομοιώσεις. Τέλος πρόκειται για ένα μοντέλο που εστιάζει κυρίως σε ευρωπαϊκές λεκάνες απορροής (Burek et al., 2013).

Πανευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων όσον αφορά τον τύπο εδάφους (King et al., 1997; Wösten et al., 1999), την κάλυψη γης (CEC, 1993), την τοπογραφία (Hiederer & de Roo, 2003) και την μετεωρολογία (Rijks et al., 1998) έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, συνεπώς θεωρήθηκε σημαντικό να δημιουργηθεί ένας μηχανισμός για την αξιοποίησή τους. Το LISFLOOD αφού δημιουργήθηκε, εφαρμόζεται με βάση αυτά τα διαθέσιμα δεδομένα και ανανεώνεται συνεχώς όσο αυτά εμπλουτίζονται (Burek et al., 2013). Τα παραπάνω δεδομένα λαμβάνονται από τις εξής βάσεις (Feyen, 2005):

- European Soil Geographical Database για τον τύπο εδάφους
- HYPRES Database για την εκτίμηση του πορώδους, της κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας και την διατήρηση της υγρασίας για κάθε είδος εδάφους
- Corine Land Cover για την κάλυψη γης
- MARS Meteorological Database για τα μετεωρολογικά δεδομένα
- Catchment Information System για την τοπογραφία

Η χωρική πληροφορία που παρέχει το LISFLOOD έχει εφαρμοστεί σε κάναβο μεγέθους από 100 μέτρα για μεσαίου μεγέθους λεκάνες απορροής, 5,000 μέτρα για την προσομοίωση του συνόλου των λεκανών της Ευρώπης έως και 10,000 μέτρα για εφαρμογή σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι προσομοιώσεις είναι δυνατές για μακροχρόνια ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου με χρήση ημερήσιου βήματος ανάλυσης, αλλά και για μεμονωμένα πλημμυρικά φαινόμενα με χρήση ωριαίων (ή και μικρότερου χρονικού βήματος) δεδομένων (Peter Burek et al., 2013).

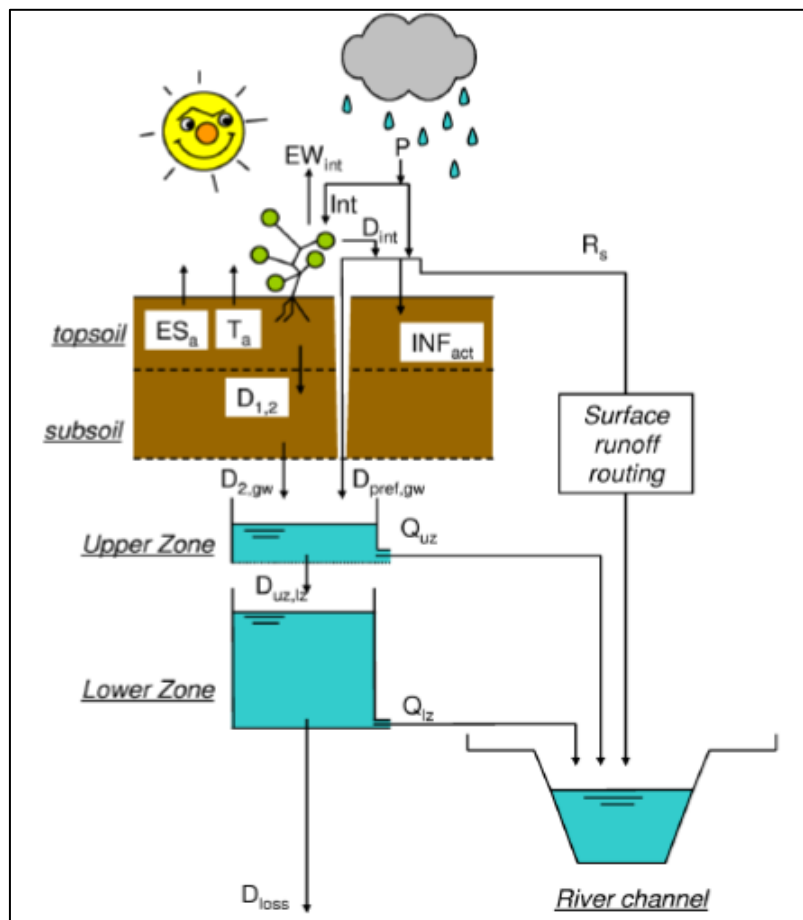
Η δομή του προγράμματος LISFLOOD αποτελείται από τις εξής τέσσερις βασικές ρουτίνες για τον υπολογισμό των συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου:

- Υπομοντέλο υδάτινου ισοζυγίου σε διστρωματικό έδαφος
- Υπομοντέλα προσομοίωσης για την υποεπιφανειακή ροή (subsurface flow) και την ροή στον υπόγειο υδροφόρα (groundwater flow)
- Υπομοντέλο διοχέτευσης της επιφανειακής απορροής στο κοντινότερο σημείο του υδρογραφικού δικτύου

- Υπομοντέλο διοχέτευσης του νερού εντός του υδρογραφικού δικτύου

Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται σχηματικά η λειτουργία του μοντέλου LISFLOOD για την υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής. Οι παράμετροι που φαίνονται εξηγούνται συνοπτικά ως εξής:

- P : βροχόπτωση
- INT : παρεμπόδιση
- EW_{int} : εξάτμιση παρεμποδισμένου νερού
- D_{int} : αποστράγγιση φυλλωμάτων
- ES_a : εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους
- T_a : διαπνοή
- INF_{act} : διήθηση
- R_s : επιφανειακή απορροή
- $D_{1,2}$: αποστράγγιση νερού από την άνω στρώση του εδάφους έως την υπόστρωση
- $D_{2,gw}$: αποστράγγιση από την εδαφική υπόστρωση στην άνω ζώνη του υδροφόρου ορίζοντα
- $D_{pref,gw}$: ροή από το έδαφος προς την άνω εδαφική στρώση
- $D_{uz,lz}$: αποστράγγιση από την άνω στρώση του υδροφόρου ορίζοντα στην χαμηλότερη
- Q_{uz} : απορροή νερού της άνω στρώσης του υδροφόρου ορίζοντα
- Q_l : απορροή της χαμηλότερης στρώσης του υδροφόρου ορίζοντα
- D_{loss} : απώλειες από την χαμηλότερη ζώνη του υδροφόρου ορίζοντα



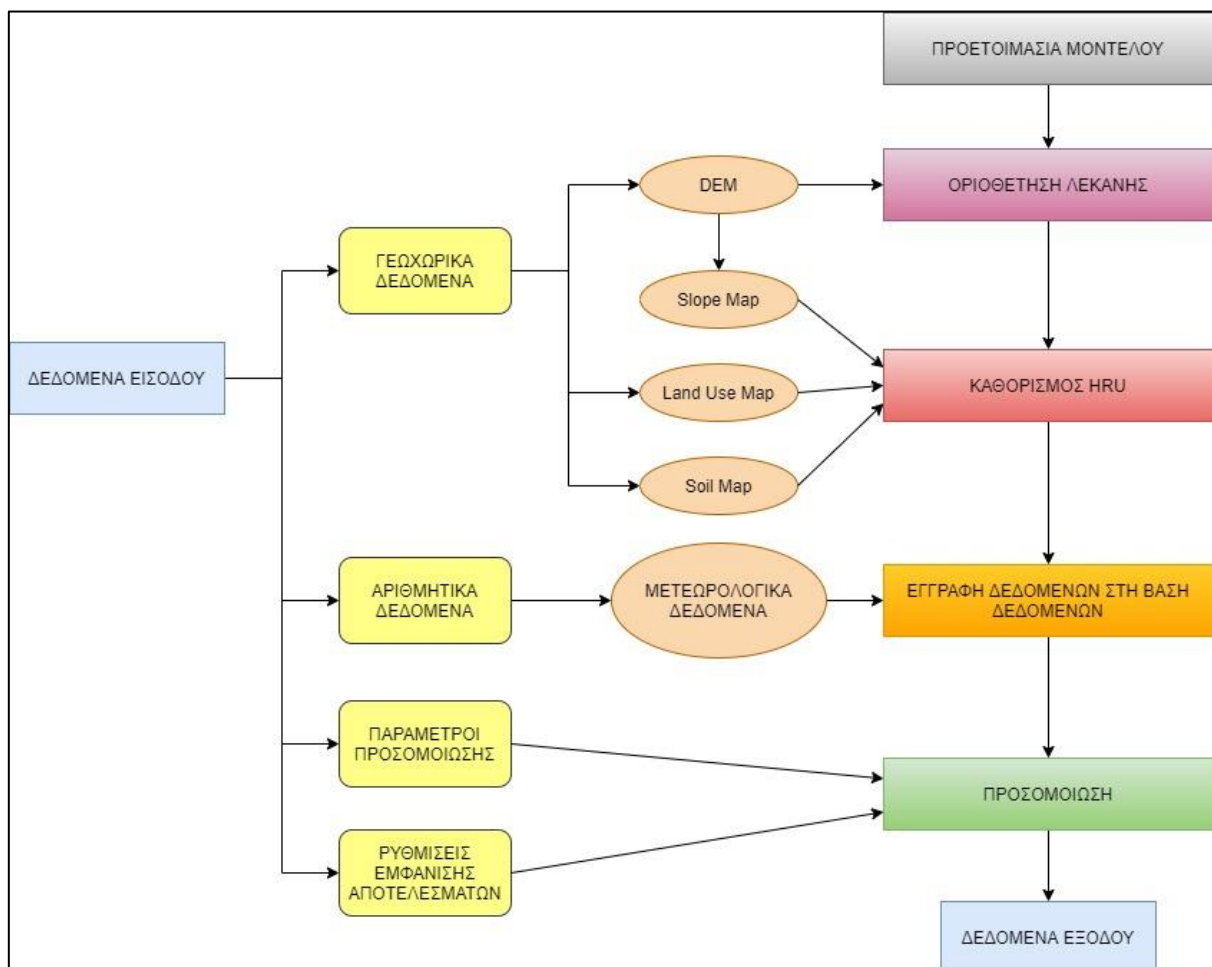
Εικόνα 11: Επισκόπηση της λειτουργίας του μοντέλου LISFLOOD (πηγή: JRC Technical Report, 2013)

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων για όλες τις ευρωπαϊκές λεκάνες εφαρμόζεται μία διαδικασία βαθμονόμησης του μοντέλου (όπως ακολουθείται και στο μοντέλο SWAT στη συνέχεια). Η μέθοδος βαθμονόμησης που έχει αναπτυχθεί για το μοντέλο LISFLOOD είναι μία αυτοματοποιημένη διαδικασία βασισμένη στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Shuffled Complex Evolution Metropolis (SCEM-UA). Η βαθμονόμηση έχει εφαρμοστεί και ελεγχθεί σε ορισμένες λεκάνες απορροής μεγάλων ποταμών της Ευρώπης όπως είναι αυτή του ποταμού Μεύση (Meuse), του Σον (Saone), του Όντερ (Odra) και του Δούναβη (Feyen, 2005).

3.2 Γενική περιγραφή διαδικασίας μοντελοποίησης και ελέγχου

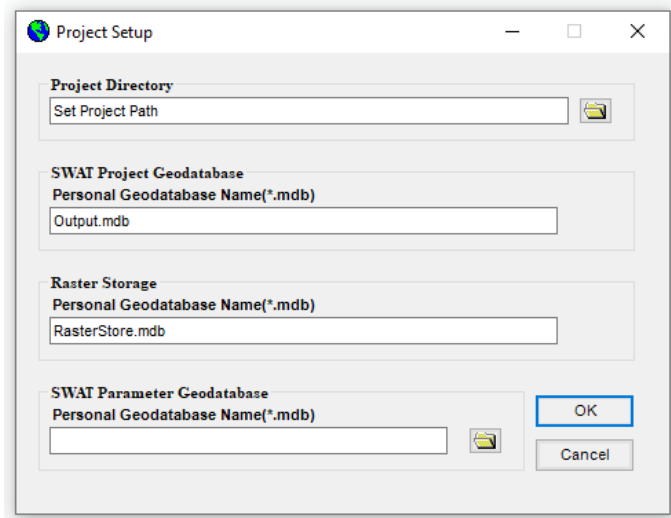
3.2.1 Διαδικασία προγράμματος SWAT

Αφού συγκεντρωθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα, γεωχωρικά και μετεωρολογικά, ακολουθούνται 5 βασικά βήματα, τα οποία οπτικοποιούνται σε ένα διάγραμμα ροής (Εικόνα 12) και αναλύονται ένα προς ένα στη συνέχεια.



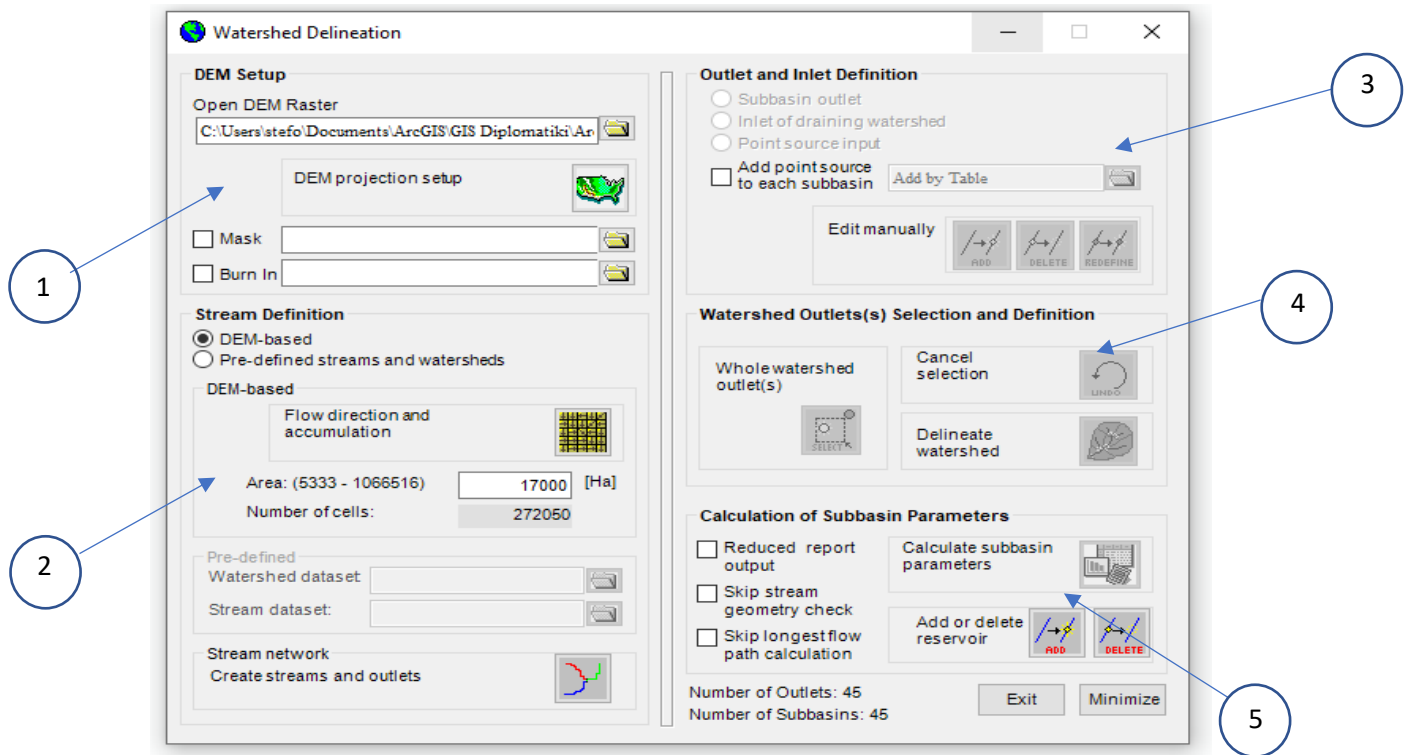
Εικόνα 12: Διάγραμμα ροής για την μοντελοποίηση στο πρόγραμμα SWAT

Προετοιμασία Μοντέλου SWAT (SWAT Project Setup): Αποτελεί το πρώτο βήμα του μοντέλου και αφορά την δημιουργία του αρχείου και την διαδρομή αποθήκευσης των αρχείων που επιλέγει ο χρήστης. Η τοποθεσία και η διάταξη με την οποία αποθηκεύονται τα αποτελέσματα και άλλα σχετικά αρχεία είναι προκαθορισμένα και δημιουργούνται αυτόματα από το πρόγραμμα (Εικόνα 13).



Εικόνα 13: (πηγή: ArcSWAT 2012)

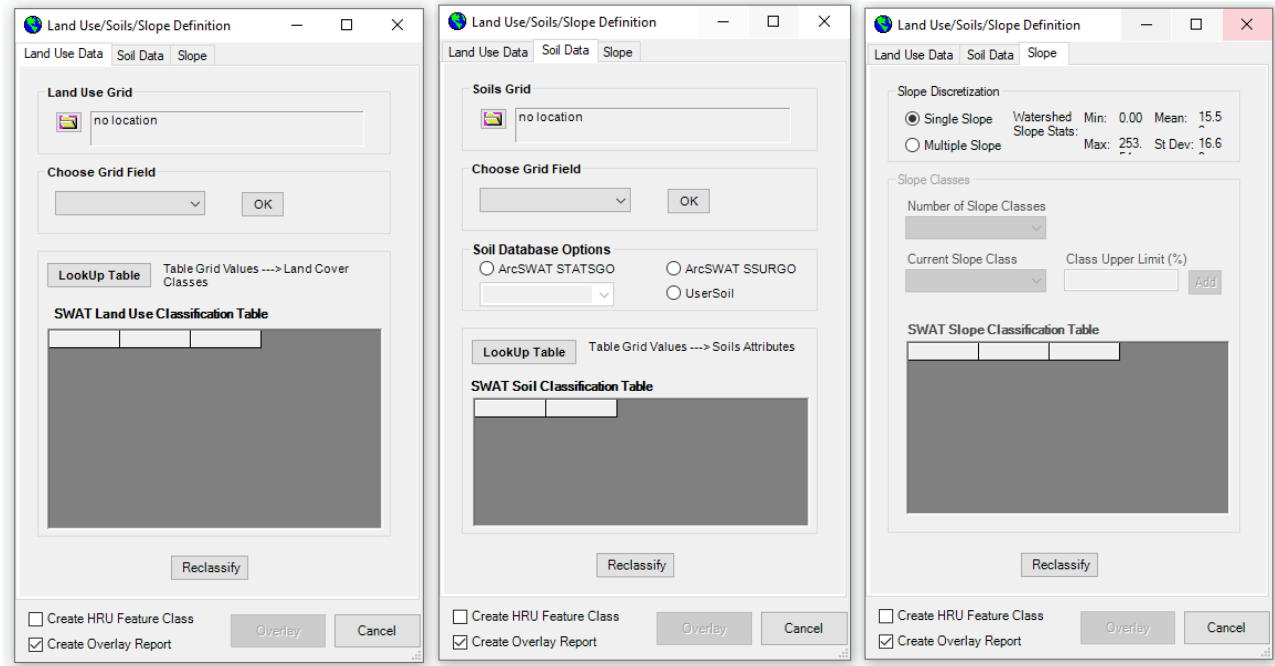
Οριοθέτηση Λεκάνης (Watershed Delineation): Σε αυτό το βήμα ξεκινάει η επεξεργασία των γεωχωρικών δεδομένων και πιο συγκεκριμένα η γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης μέσω του αντίστοιχου DEM (Εικόνα 14). Ο χάρτης εδάφους πρέπει αρχικά να προβληθεί σε ένα ορισμένο σύστημα συντεταγμένων και να καθοριστεί η μονάδα μέτρησης των υψών (1). Έπειτα το πρόγραμμα σχεδιάζει το υδρογραφικό δίκτυο, υπολογίζοντας ταυτόχρονα τον κλίση και συγκέντρωση ροής (2). Η λεπτομέρεια με την οποία ορίζονται τα υδατορέματα εξαρτάται από το κατώφλι που θα επιλεγεί από τον χρήστη. Στη συνέχεια ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσθέσει σημεία εισροών και εκροών σε περίπτωση ύπαρξης αντίστοιχων τεχνικών έργων για τα οποία υπάρχει πληροφορία (3). Αφού καθοριστούν όλα τα παραπάνω, τότε γίνεται η τελική επιλογή του σημείου εξόδου της λεκάνης για την οριοθέτηση της (4). Η λεκάνη χωρίζεται έτσι σε υπολεκάνες στα σημεία όπου εμφανίζονται οι διακλαδώσεις του δικτύου. Τέλος, εάν ο χρήστης το επιθυμεί, το μοντέλο μπορεί να φτιάξει μία τοπογραφική αναφορά στην οποία περιέχονται βασικά στοιχεία της λεκάνης και των υπολεκάνων αυτής, όπως το μέσο υψόμετρο, η μέση κλίση και το ποσοστό της επιφάνειας που ανήκει σε κάθε κατηγορία κλίσης ή υψομέτρου. Όσον αφορά το υδρογραφικό δίκτυο υπολογίζει το μήκος εντός κάθε υπολεκάνης αλλά και το μέγιστο μήκος ροής (longest flowpath) (5).



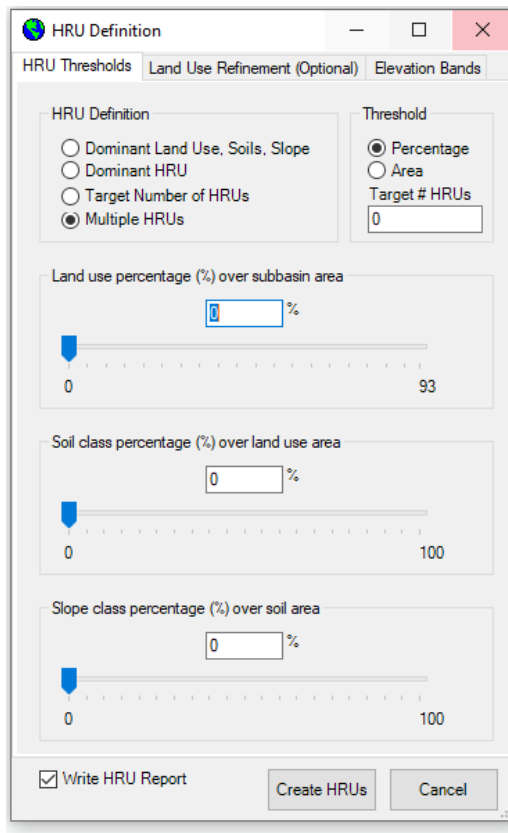
Εικόνα 14: (πηγή: ArcSWAT 2012)

Διαχωρισμός Λεκάνης σε HRUs (HRU Analysis): Επόμενο βήμα, όπως έχει αναφερθεί και στο θεωρητικό υπόβαθρο, είναι ο περαιτέρω διαχωρισμός των υπολεκανών σε HRUs. Σε αυτό το σημείο εισέρχονται τα υπόλοιπα γεωχωρικά δεδομένα, δηλαδή ο χάρτης χρήσεων γης και ο χάρτης εδάφους. Για την χρήση των χαρτών αυτών απαιτείται μία προεργασία. Επειδή οι αρχικές βάσεις δεδομένων του προγράμματος είναι συγκεκριμένες και έχουν αναπτυχθεί κατά τα αμερικάνικα πρότυπα, για περιοχές εκτός ΗΠΑ πρέπει να γίνει η κατάλληλη αντιστοίχιση των κατηγοριών εδάφους και χρήσεων γης ώστε το πρόγραμμα να μπορέσει να τα αναγνωρίσει και να τους προσδώσει τις απαραίτητες ιδιότητες. Η διαδικασία αντιστοίχισης που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται εκτενώς στο υποκεφάλαιο 3.3.2. Αφού γίνει η διαδικασία αυτή, φορτώνονται οι χάρτες στο περιβάλλον του GIS και ομαδοποιούνται καταλλήλως οι διαφορετικές κατηγορίες εδαφών και χρήσεων γης. Έτσι δημιουργείται σε κάθε μία περίπτωση ένας νέος χάρτης σε raster μορφή. Έπειτα για την επανακατηγοριοποίηση των κλίσεων, που είναι το τρίτο και τελευταίο στοιχείο που χαρακτηρίζει ένα HRU, επιλέγεται ο αριθμός των ομάδων κλίσεων που θέλει ο χρήστης να χωρίσει το υπόβαθρο και τα εύρη της κάθε μίας. Δημιουργείται έτσι ένας ακόμα raster χάρτης. Στην συνέχεια, γίνεται η επικάλυψη των τριών χαρτών που έχουν δημιουργηθεί ώστε κάθε εικονοστοιχείο της λεκάνης να ανήκει σε μία κατηγορία εδάφους, χρήσης γης και κλίσης. Στην Εικόνα 15 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα παράθυρα εντολών του περιβάλλοντος ArcSWAT για τις τρεις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν ένα HRU. Τελευταίο βήμα είναι ο τελικός καθορισμός των HRU. Ο χρήστης σε αυτό το σημείο πρέπει να προσδιορίσει τα κριτήρια με τα οποία θα γίνει η κατανομή της έκτασης της λεκάνης σε HRUs. Δύο είναι οι διαθέσιμες επιλογές που παρέχονται από το πρόγραμμα. Η πρώτη επιλογή είναι να διανεμηθεί η κάθε υπολεκάνη σε μόνο ένα HRU με βάση την κυρίαρχη κατηγορία εδάφους, χρήσης γης και κλίσης. Η δεύτερη επιλογή είναι ο διαχωρισμός σε πολλαπλά HRU. Σε αυτή τη περίπτωση ο χρήστης επιλέγει την ευαισθησία για τις τρεις παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των HRU σε κάθε λεκάνη απορροής (Winchell et al., 2013). Η ευαισθησία καθορίζεται, για κάθε παράμετρο, από την έκταση ή το ποσοστό της έκτασης της υπολεκάνης, κάτω από το οποίο θεωρείται αμελητέα και δεν λαμβάνεται υπόψιν για τον ορισμό των HRU (Εικόνα 16).

Όπως και στην οριοθέτηση της λεκάνης παράγεται ως δεδομένο εξόδου μία αναφορά για την κατανομή των HRUs που προκύπτουν μετά την εφαρμογή των κατωφλίων στις παραμέτρους.



Εικόνα 15: Από αριστερά προς τα δεξιά φαίνονται τα παράθυρα για την επεξεργασία των χρήσεων γης, του εδάφους και των κλίσεων (πηγή: ArcSWAT 2012)

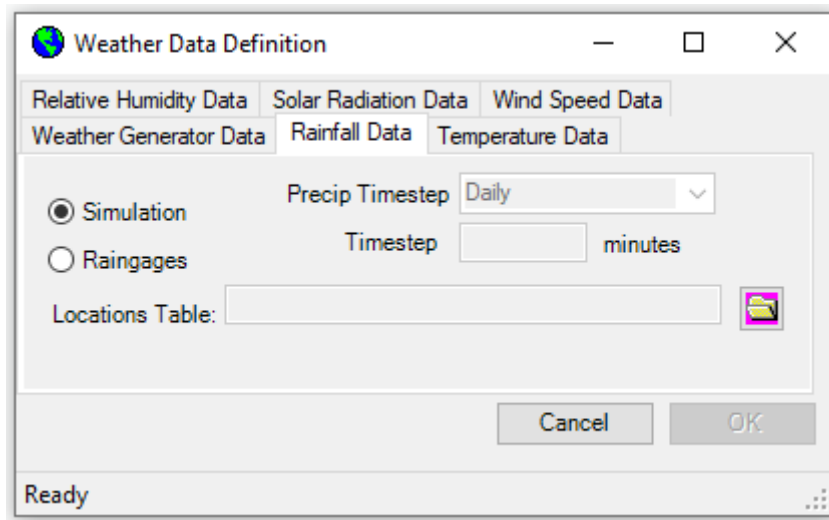


Εικόνα 16: (πηγή: ArcSWAT 2012)

Εγγραφή Δεδομένων (Write Input Tables): Αφού στηθεί το γεωχωρικό κομμάτι του μοντέλου, σειρά έχει η εισαγωγή των υδρομετεωρολογικών δεδομένων για να ολοκληρωθεί η εγγραφή των δεδομένων εισόδου. Οι τύποι των δεδομένων από κοντινούς σταθμούς που μπορούν να εμπλουτίσουν ένα μοντέλο είναι 5 (Εικόνα 17):

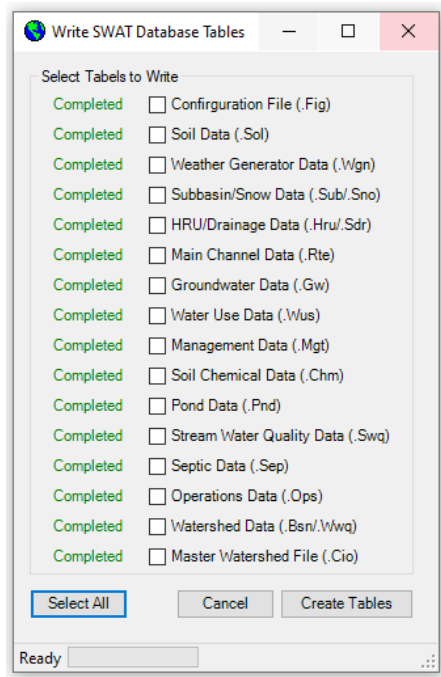
- Δεδομένα Βροχόπτωσης
- Δεδομένα Θερμοκρασίας
- Δεδομένα Έντασης Ανέμου
- Δεδομένα Σχετικής Υγρασίας
- Δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας

Σε αυτό το σημείο αν δεν είναι διαθέσιμα δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η γεννήτρια κλιματικών δεδομένων του λογισμικού που περιέχει δεδομένα από διάφορους σταθμούς του αμερικάνικου δικτύου (χρησιμοποιείται μόνο για περιοχές εντός των ΗΠΑ). Εκτός των δεδομένων πρέπει να καθοριστούν γεωγραφικά οι θέσεις των σταθμών που θα χρησιμοποιηθούν. Το μοντέλο τελικά θα συνδέσει την κάθε υπολεκάνη με τα δεδομένα από τον κοντινότερο εκ των σταθμών (Winchell et al., 2013).



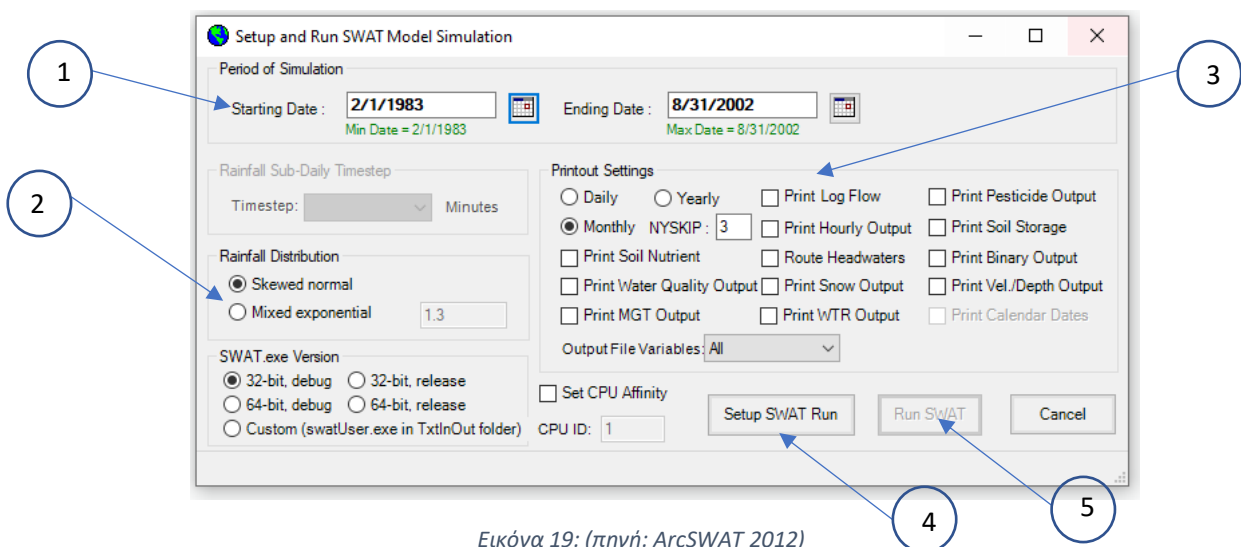
Εικόνα 17: (πηγή: ArcSWAT 2012)

Αφού τελειώσει η εισαγωγή όλων των δεδομένων, γίνεται η εγγραφή αυτών στην βάση δεδομένων που είναι συνδεδεμένο με το αρχείο. Γράφονται όλοι οι πίνακες ακόμα και αν δεν υπάρχουν δεδομένα για ορισμένους από αυτούς. Στην περίπτωση αυτή η συμπλήρωση τους γίνεται αυτόματα με ορισμένες, από το πρόγραμμα, τιμές (Εικόνα 18).



Εικόνα 18: (πηγή: ArcSWAT 2012)

Προσομοίωση (SWAT Simulation): Όταν ολοκληρωθεί η ενημέρωση της βάσης δεδομένων μπορεί να ξεκινήσει το τελευταίο βήμα της μοντελοποίησης. Στο παράθυρο που αφορά την προσομοίωση επιτρέπεται στο χρήστη να ολοκληρώσει το στήσιμο του μοντέλου, να πραγματοποιήσει ανάλυση ευαισθησίας, να διατάξει το πρόγραμμα να πραγματοποιήσει αυτόματη βαθμονόμηση και τέλος να τρέξει την προσομοίωση (Εικόνα 19). Πριν την προσομοίωση επιλέγονται η χρονική περίοδος για την οποία θέλει ο χρήστης να τρέξει την προσομοίωση (1), η παράμετρος με την οποία θα γίνει η χωρική κατανομή της βροχόπτωσης (2) και τέλος οι ρυθμίσεις των δεδομένων εξόδου (3). Αυτό αφορά κυρίως το χρονικό βήμα των αποτελεσμάτων που μπορεί να είναι ημερήσιο, μηνιαίο ή ετήσιο και τα έτη της προσομοίωσης που θα χρειαστούν για την προθέρμανση (warm-up period) του μοντέλου. Όταν προσδιοριστούν και αυτά τα τελευταία στοιχεία γίνεται προετοιμασία του εκτελέσιμου αρχείου (4) και μπορεί να ξεκινήσει η προσομοίωση (5).



Εικόνα 19: (πηγή: ArcSWAT 2012)

3.2.2 Βαθμονόμηση και επαλήθευση μοντέλου

Όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση ο χρήστης επιλέγει τις ομάδες αποτελεσμάτων που τον ενδιαφέρουν κάθε φορά και τα εισάγει στην βάση δεδομένων ώστε να μπορεί να γίνει η αξιολόγηση τους με πραγματικές μετρήσεις που υπάρχουν για την περιοχή. Όπως έχει αναφερθεί ήδη το πρόγραμμα διαθέτει μία βάση δεδομένων στην οποία υπάρχουν οι αριθμητικές τιμές διάφορων παραμέτρων που περιγράφουν τις φυσικές, χημικές και υδρολογικές ιδιότητες για τα εδάφη και τις χρήσεις γης. Για την περιγραφή της υδρολογικής απόκρισης της εκάστοτε λεκάνης απορροής αυτές οι παράμετροι μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν ορθά την πραγματικότητα και τα αποτελέσματα του μοντέλου να αποκλίνουν από τις μετρήσεις πεδίου. Έτσι το μοντέλο πρέπει να βαθμονομηθεί καταλλήλως για να επιτευχθεί η όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση.

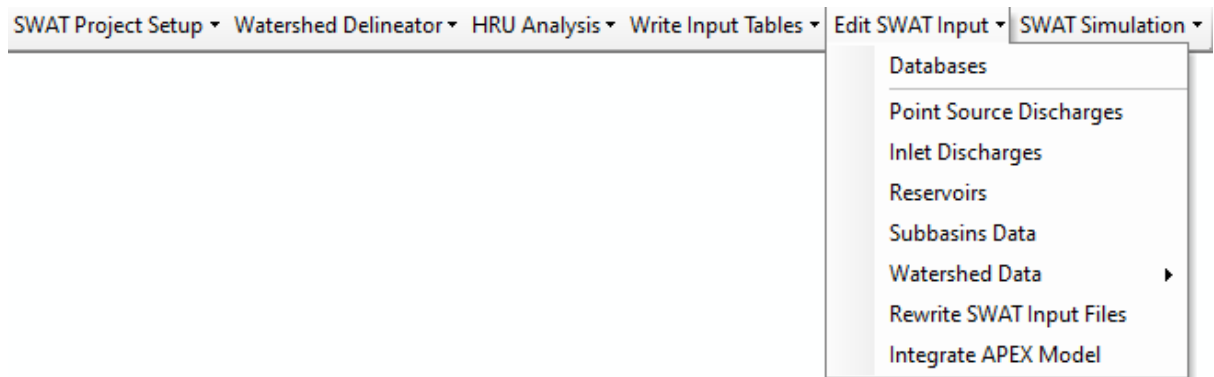
Πρώτο βήμα είναι η εύρεση των παραμέτρων που θα υποστούν επεξεργασία. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί βιβλιογραφικά ακολουθώντας την κρίση των ειδικών ή εφαρμόζοντας μία ανάλυση ευαισθησίας που να αφορά το συγκεκριμένο μοντέλο. Δεύτερο βήμα είναι η διαδικασία της βαθμονόμησης κατά την οποία οι ήδη επιλεγμένοι, από το προηγούμενο βήμα, παράμετροι επεξεργάζονται από τον χρήστη. Η επιλογή των τιμών των παραμέτρων γίνεται προσεκτικά σε σύγκριση με τα παρατηρηθέντα στοιχεία για όμοιες συνθήκες (Arnold et al., 2012). Τελευταίο βήμα είναι η επαλήθευση του μοντέλου. Η επαλήθευση είναι η διαδικασία κατά την οποία ελέγχεται ότι το μοντέλο είναι ικανό να κάνει προσομοιώσεις με επαρκή ακρίβεια. Η ακρίβεια ωστόσο μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τους στόχους της κάθε εργασίας (Refsgaard, 1997). Η επαλήθευση περιλαμβάνει το τρέξιμο του μοντέλου με τις παραμέτρους που έχουν καθοριστεί μετά την βαθμονόμηση, χρησιμοποιώντας όμως για σύγκριση παρατηρηθέντα δεδομένα που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί κατά την βαθμονόμηση (Arnold et al., 2012) (π.χ. άλλη περίοδο της χρονοσειράς των δεδομένων).

Για να γίνει σωστά η διαδικασία και να προκύψει μία καλή βαθμονόμηση πρέπει να ισχύουν τα εξής:

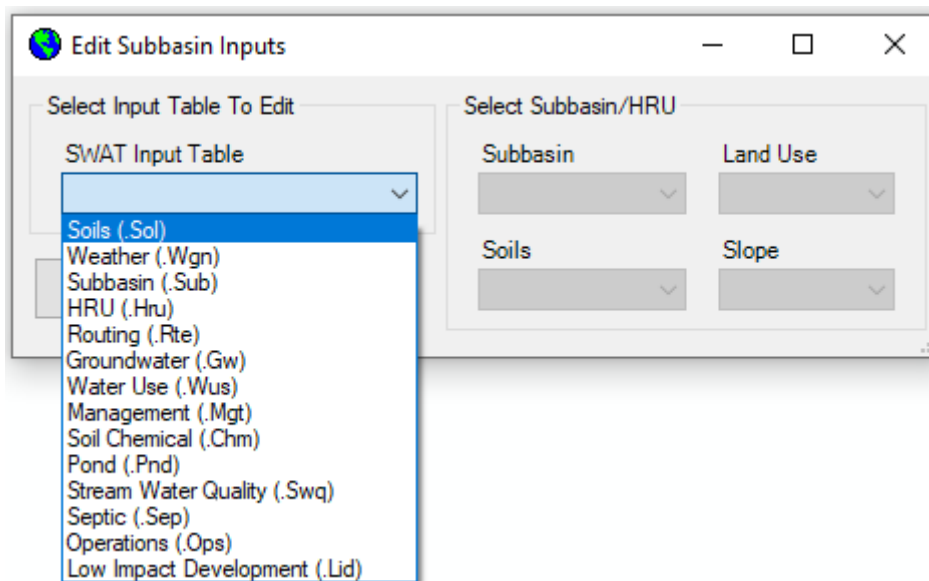
- Η χρονοσειρά των παρατηρηθέντων δεδομένων πρέπει να περιέχει ξηρές και υγρές περιόδους (Gan et al. 1997)
- Χρήση διάφορων τεχνικών επαλήθευσης (ASCE, 1993; Legates and McCabe, 1999; Boyle et al., 2000)
- Η βαθμονόμηση να γίνει για όλα τα συστατικά που πρόκειται να αξιολογηθούν (Arnold et al., 2012)
- Επιβεβαίωση ότι άλλα σημαντικά αποτελέσματα του μοντέλου είναι λογικά (Arnold et al., 2012)

Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει με χρήση του λογισμικού αυτόματης βαθμονόμησης του SWAT (van Griensven and Bauwens, 2003; Van Liew et al., 2005), άλλων αντίστοιχων προγραμμάτων όπως το SWAT-CUP (Abbaspour et al., 2007) ή και χειροκίνητα. Στην παρούσα εργασία η βαθμονόμηση γίνεται χειροκίνητα, αλλάζοντας δηλαδή μεμονωμένα κάθε παράμετρο ενδιαφέροντος.

Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψιν από το μοντέλο είναι πολλοί και αφορούν πολλά διαφορετικά στοιχεία ενός υδρολογικού κύκλου όπως η εξατμισοδιαπνοή, η κατακράτηση νερού από τα φυτά, η διήθηση και άλλα. Το πρόγραμμα επιτρέπει στον χρήστη να μεταβάλλει τις τιμές σε επίπεδο ολόκληρης της λεκάνης απορροής, υπολεκανών, και HRU από το παράθυρο “Edit SWAT Table” (Εικόνα 20). Στην Εικόνα 21 εντοπίζονται οι ομάδες παραμέτρων που μπορούν να επεξεργασθούν από το χρήστη σε επίπεδο υπολεκανών και HRU ενώ υπάρχουν και άλλες που αφορούν ολόκληρη την λεκάνη απορροής.



Εικόνα 20: (πηγή: ArcSWAT 2012)



Εικόνα 21: (πηγή: ArcSWAT 2012)

3.2.3 Έλεγχος βαθμονόμησης

Για να υπάρχει μία εποπτεία για το πόσο σωστό είναι ένα υδρολογικό μοντέλο υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος στατιστικών ελέγχων που προτείνονται από την βιβλιογραφία. Συνολικά έχουν περιγραφεί σχεδόν 20 διαφορετικοί στατιστικοί έλεγχοι (Arnold et al., 2012). Οι πιο συνηθισμένοι εξ αυτών υπολογίζονται στην παρούσα εργασία και είναι οι εξής:

- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970)
- Συντελεστής Προσδιορισμού R² (Coefficient of determination)
- Συντελεστής PBIAS (percent bias)

Τα στοιχεία που συγκρίνονται για κάθε έλεγχο χωρίζονται στα παρατηρημένα (observed data) και στα προσομοιωμένα αποτελέσματα του μοντέλου (simulated data). Οι δύο αυτές χρονοσειρές συγκρίνονται σε επιλεγμένες θέσεις της λεκάνης και προκύπτουν έτσι οι στατιστικοί συντελεστές.

Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE): Είναι ένας κανονικοποιημένος στατιστικός συντελεστής που καθορίζει την σχετική σημασία της υπολειμματικής διασποράς σε σχέση με αυτήν των μετρημένων τιμών (Nash & Sutcliffe, 1970). Δείχνει πόσο καλά εφαρμόζει η γραφική παράσταση των μοντελοποιημένων και μετρημένων τιμών την ευθεία 1:1. Θεωρείται ο κατεξοχήν στατιστικός

έλεγχος για την υδρολογία. Λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1, με την τιμή 1 να αντιπροσωπεύει τέλειο ταίριασμα των χρονοσειρών, και υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{obs,av})^2} \quad (3)$$

Όπου:

- $Q_{obs,i}$: η παρατηρημένη παροχή στο βήμα i
- $Q_{sim,i}$: η προσομοιωμένη παροχή στο βήμα i
- $Q_{obs,av}$: η μέση τιμή των παρατηρημένων παροχών

Συντελεστής προσδιορισμού R^2 : Πρόκειται για έναν ευρέως διαδεδομένο στατιστικό έλεγχο που εφαρμόζεται σε πολλούς επιστημονικούς τομείς. Μετράει την διακύμανση μίας εξαρτημένης μεταβλητής y (αποτελέσματα προσομοίωσης) με βάση τις τιμές μίας ανεξάρτητης μεταβλητής (παρατηρημένα δεδομένα). Ο στόχος του είναι είτε η πρόβλεψη μελλοντικών αποτελεσμάτων, είτε η σύγκριση και αξιολόγηση υποθέσεων βασισμένων σε ανάλογες συνθήκες. Στην δεύτερη περίπτωση ποσοτικοποιεί πόσο καλά αναπαρίστανται τα παρατηρημένα δεδομένα από ένα μοντέλο υπολογισμού. Οι τιμές που μπορεί να πάρει κυμαίνονται από 0 έως 1 με το 1 να υποδεικνύει πλήρη ταύτιση και εκτιμάται από την Εξίσωση 4.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (4)$$

Όπου:

- SS_{res} : υπολειμματικό άθροισμα τετραγώνων
- SS_{tot} : το συνολικό άθροισμα τετραγώνων των δεδομένων

Συντελεστής PBIAS: Είναι ο τρίτος και τελευταίος συντελεστής που χρησιμοποιείται και μετράει την μέση τάση της προσομοιωμένης χρονοσειράς να περιέχει μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές από την μετρημένη χρονοσειρά. Λαμβάνει τιμές από -1 έως 1 με το 0 να υποδηλώνει την μέγιστη ταύτιση και υπολογίζεται από την Εξίσωση 5.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs} - Y_{i,sim})}{\sum_{i=1}^n (Y_{i,obs})} \quad (5)$$

Όπου:

- $Y_{i,obs}$: η παρατηρημένη τιμή στο βήμα i
- $Y_{i,sim}$: η προσομοιωμένη τιμή στο βήμα i

3.3 Περιγραφή μοντελοποίησης στον άνω ρου του ποταμού Πηνειού

Ως περιοχή μελέτης για την εφαρμογή του μοντέλου SWAT επιλέχθηκε ο Πηνειός ποταμός στην Θεσσαλία και πιο συγκεκριμένα μία υπολεκάνη στο βορειοδυτικό τμήμα της με έξοδο στην ευρύτερη περιοχή των Τρικάλων.

3.3.1 Προεπεξεργασία γεωχωρικών δεδομένων με χρήση του Arcmap

Τα γεωχωρικά δεδομένα ελήφθησαν από διαφορετικούς ευρωπαϊκούς και παγκόσμιους οργανισμούς όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω. Για τον λόγο αυτό αρχικά πρέπει να καθοριστεί ένα ενιαίο σύστημα προβολής των συντεταγμένων και εν συνεχεία να εντοπιστεί η περιοχή μελέτης ώστε να κοπούν οι χάρτες αναλόγως. Η διαδικασία ξεκινάει με την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου

εδάφους για την εύρεση της έκτασης της λεκάνης απορροής. Αρχικά το διαθέσιμο DEM καλύπτει μία μεγάλη έκταση της Ελλάδας, εκτός από την περιοχή ενδιαφέροντος. Προσεγγιστικά λοιπόν, με την χρήση του εργαλείου clip επιλέγεται το εύρος που ανήκει στην περιοχή της Θεσσαλίας. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η έκταση για την οποία στην συνέχεια θα εφαρμόζονται όλες οι άλλες εντολές και μειώνεται συνεπώς ο υπολογιστικός φόρτος.

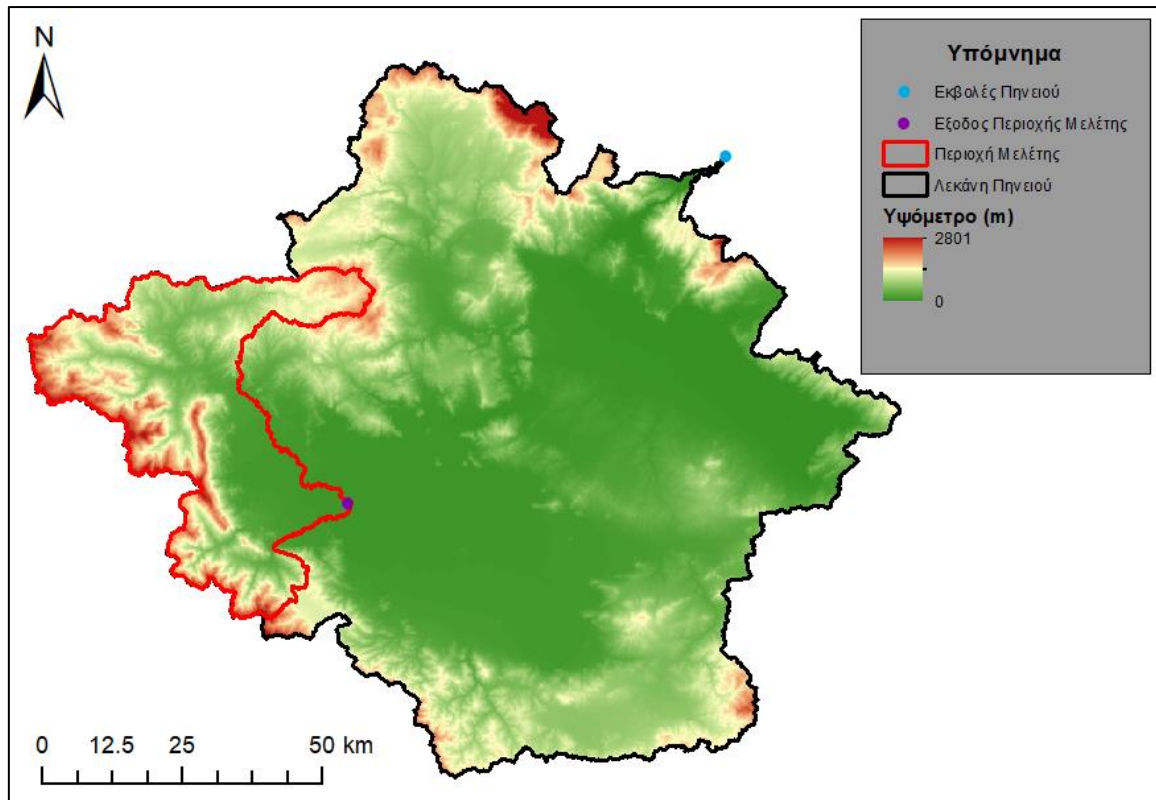
Αφού γίνει η παραπάνω διαδικασία με τις εντολές fill και raster calculator γίνεται η διόρθωση του DEM για τυχόν ατέλειες που μπορεί να υπάρχουν (απότομα βυθίσματα ή ανυψώσεις στο έδαφος) και απαλλάσσεται ο χάρτης από αρνητικές τιμές υψομέτρου. Έπειτα γίνεται μία προσωρινή υδρολογική ανάλυση με τις εντολές flow direction (κατεύθυνση ροής), και flow accumulation (συγκέντρωση ροής). Επιλέγεται το κατώφλι ορισμού του υδρογραφικού δικτύου και με την εντολή raster to polyline προκύπτει μία πρώτη προσέγγιση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής που καλύπτει το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Εντοπίζεται η έξοδος του προς εξέταση υδατορέματος όπου με την εντολή draw προστίθεται στο χάρτη ένα σημείο στις εκβολές. Ως προς το σημείο αυτό εφαρμόζεται η εντολή watershed και έτσι δημιουργείται η συνολική λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού η οποία μετατρέπεται σε πολύγωνο με την εντολή raster to polygon. Τελευταίο βήμα είναι η περικοπή του DEM της περιοχής στα όρια της λεκάνης. Το τελικό προϊόν της επεξεργασίας είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους που τελικά εισέρχεται στο μοντέλο SWAT.

Οι χάρτες χρήσεων γης και τύπου εδάφους αναφέρονται επίσης σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο αντίστοιχα. Συνεπώς επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία περικοπής αυτών με βάση το πολύγωνο της λεκάνης που έχει προκύψει. Οι ενδιάμεσοι αυτοί χάρτες που προκύπτουν από την προεπεξεργασία στο ArcMap, αποτελούν τα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο SWAT, παρουσιάζονται στο παράρτημα (Χάρτες 16, 17). Επιπλέον στο παράρτημα δίνονται τα υπομνήματα των αντίστοιχων οργανισμών για τις κατηγορίες εδαφών και χρήσεων γης (Εικόνες 49, 50). Μετά από αυτή τη διαδικασία τα γεωχωρικά δεδομένα είναι έτοιμα για χρήση εντός του περιβάλλοντος ArcSWAT.

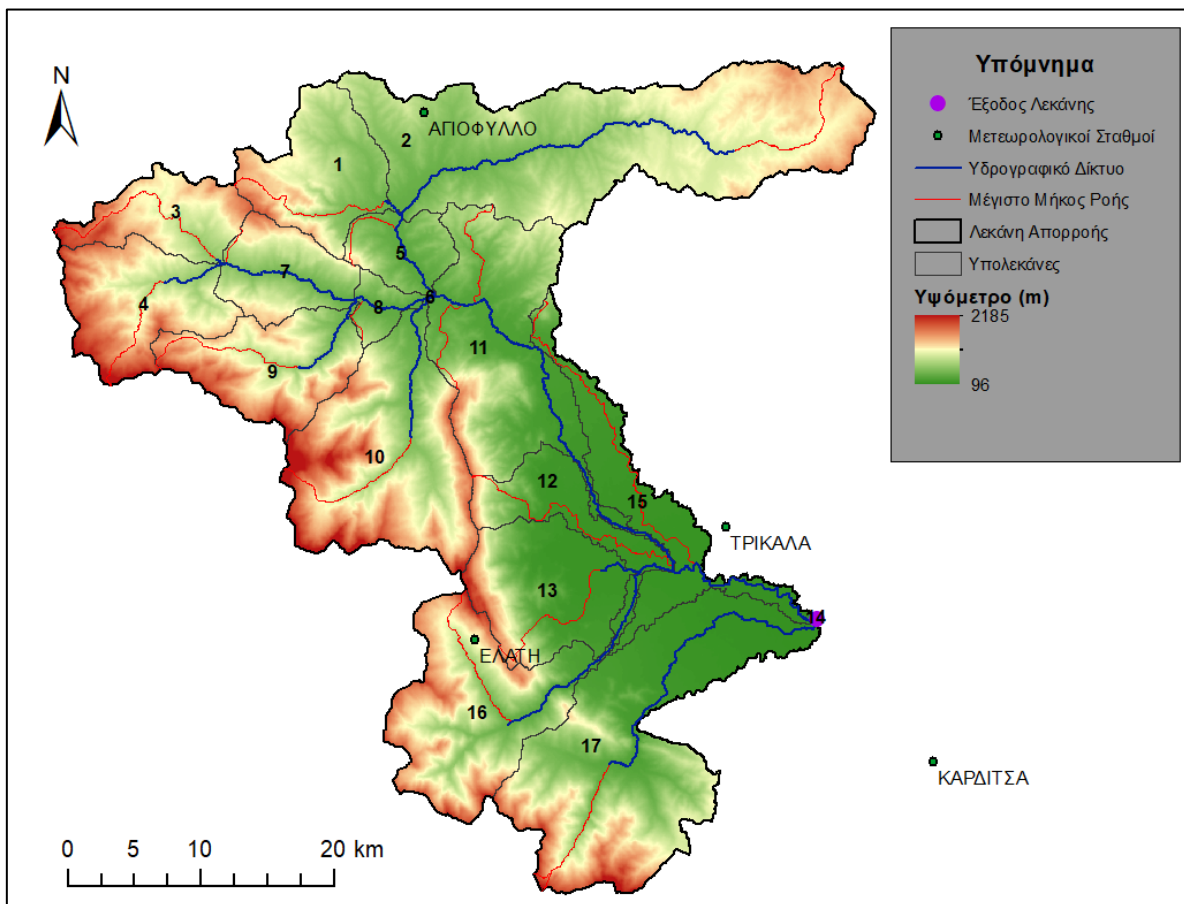
3.3.2 Εφαρμογή του μοντέλου SWAT

Για την μοντελοποίηση στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εφαρμόζονται τα βήματα που αναλύονται στο υποκεφάλαιο 3.2.1 χρησιμοποιώντας τους χάρτες που περιέχουν την γεωχωρική πληροφορία σε συνδυασμό με τα μετεωρολογικά δεδομένα των επιλεγμένων σταθμών.

Η δημιουργία του μοντέλου ξεκινάει με την οριοθέτηση της λεκάνης απορροής. Αρχικά εισέρχεται σαν ψηφιακό μοντέλο εδάφους αυτό της συνολικής λεκάνης του Πηνειού και δημιουργούνται εκ νέου το υδρογραφικό δίκτυο αυτή τη φορά αυτόματα από το πρόγραμμα. Εν τέλει αυτό είναι που θα ληφθεί υπόψιν από εδώ και στο εξής. Η λεπτομέρεια ορισμού των κλάδων του δικτύου εξαρτάται από το κατώφλι που επιλέγεται από τον χρήστη και αφορά την ελάχιστη έκταση απορροής πάνω από την οποία θεωρείται λογική η δημιουργία του υδατορέματος. Το κατώφλι αυτό επιλέγεται ίσο με 60 km². Στην συνέχεια επιλέγεται το σημείο εξόδου για την λεκάνη στην οποία θα πραγματοποιηθεί η υδρολογική προσομοίωση στη συνέχεια. Το σημείο τοποθετείται λίγο νοτιότερα από την πόλη των Τρικάλων με τέτοιο τρόπο ώστε να περιέχει τις υπολεκάνες της Καλαμπάκας, της Πύλης και του Μουζακίου. Από αυτό το σημείο και ανάντη οριοθετείται η τελική λεκάνη ενδιαφέροντος (Χάρτης 4). Η έκταση αυτή χωρίζεται από το πρόγραμμα σε υπολεκάνες ώστε σε κάθε κλάδο του υδρογραφικού δικτύου να αντιστοιχεί και μία υπολεκάνη. Ο συνολικός αριθμός υπολεκανών ανέρχεται στις 17 (Χάρτης 5). Οι βασικές πληροφορίες που προκύπτουν από την οριοθέτηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 16, επίσης στην Εικόνα 22 δίνεται η υψογραφική καμπύλη της συνολικής περιοχής μελέτης.



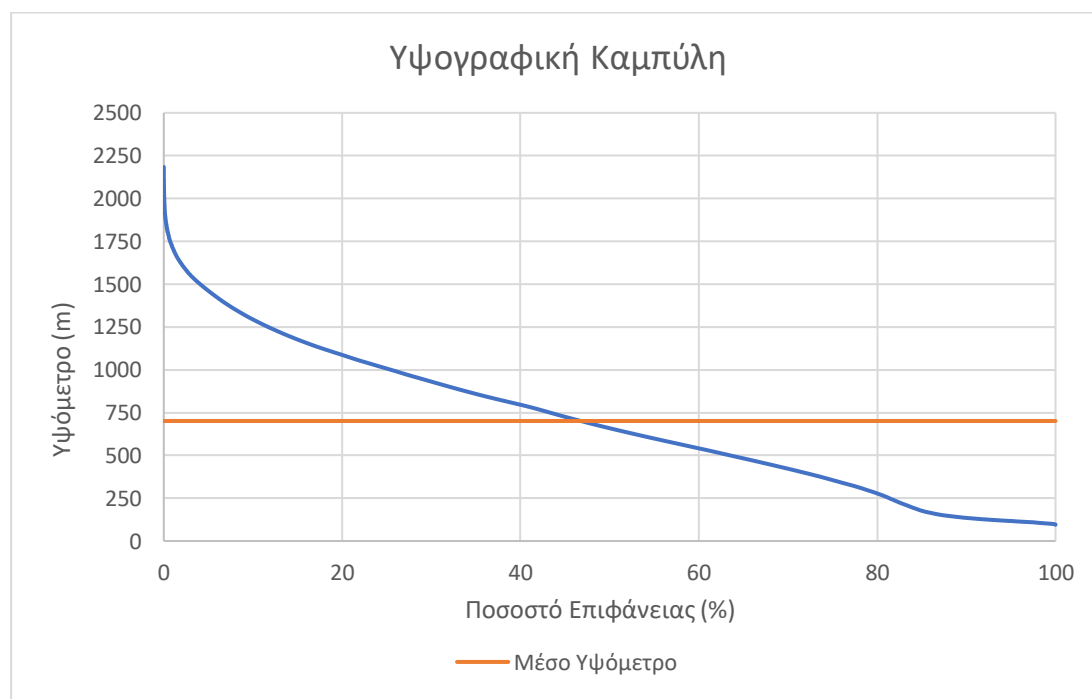
Χάρτης 4: Τοποθεσία της περιοχής μελέτης σε σχέση με την συνολική λεκάνη του Πηνειού



Χάρτης 5: Οριοθέτηση της περιοχής μελέτης και θέσεις μετεωρολογικών σταθμών

Πίνακας 16: Βασικά στοιχεία υπολεκανών μετά την οριοθέτηση όπως εμφανίζονται στην τοπογραφική αναφορά του ArcSWAT

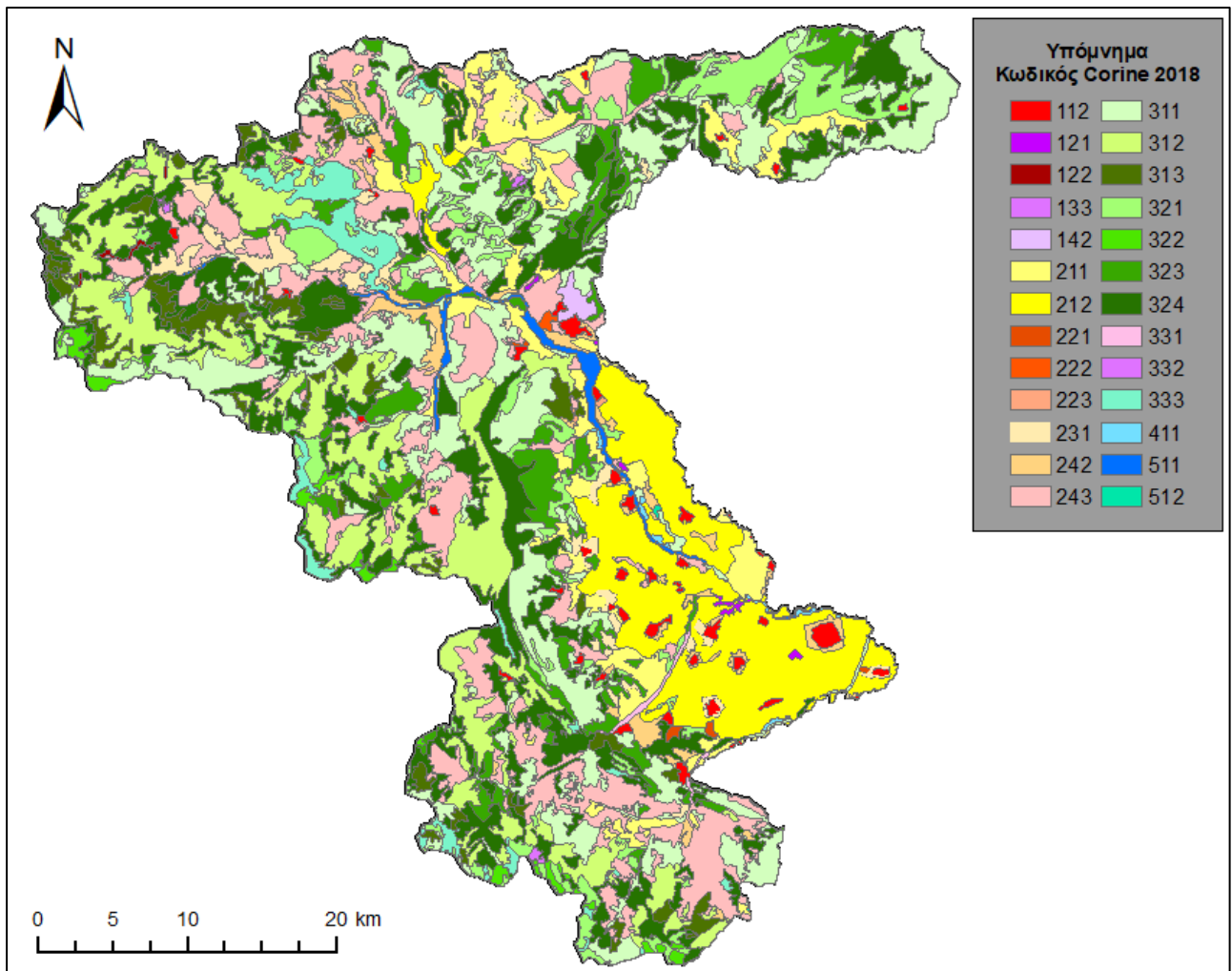
Λεκάνη	Ελάχιστο Υψόμετρο (m)	Μέγιστο Υψόμετρο (m)	Μέσο Υψόμετρο (m)	Έκταση (km ²)
1	282	1564	731	87.54
2	294	1426	732	312.62
3	465	1802	1062	60.57
4	441	1956	1129	93.59
5	255	1096	449	39.22
6	261	304	269	0.17
7	320	1564	712	59.06
8	266	1029	418	16.97
9	322	2006	1055	91.35
10	232	2184	966	182.01
11	111	1793	360	170.81
12	111	1659	265	52.59
13	114	1861	459	101.65
14	95	99	97	0.02
15	95	666	133	89.45
16	114	1836	744	150.18
17	95	1964	552	248.35
Σύνολο	95	2184	701	1756.15



Εικόνα 22: Υψογραφική καμπύλη περιοχής μελέτης όπως προκύπτει από την τοπογραφική αναφορά του ArcSWAT

Σειρά έχει ο καθορισμός των Μονάδων Υδρολογικής Απόκρισης της κάθε υπολεκάνης. Πρώτα, απαιτείται η επεξεργασία των τύπων χρήσης γης και εδάφους ώστε να αντιστοιχίζονται με αυτές που υπάρχουν στην βάση δεδομένων του SWAT. Ξεκινώντας με τις κατηγορίες χρήσεων γης, οι κωδικοί

του Corine 2018 που είναι διαθέσιμοι από τον δεδομένο χάρτη πρέπει να μετατραπούν σε SWAT Land Use κατηγορίες. Επειδή η ακριβής αντιστοίχιση είναι αδύνατη γίνεται ομαδοποίηση κατηγοριών με παρόμοια χαρακτηριστικά και στη συνέχεια μετά από διερεύνηση σε σχετική βιβλιογραφία ολοκληρώνεται η αντιστοίχιση τους. Για την αντιστοίχιση των χρήσεων γης σε αυτές της βάσης δεδομένων του SWAT δημιουργείται αρχείο .txt (Lookup Table) που φορτώνεται στο μοντέλο και η διαδικασία ολοκληρώνεται με την παραγωγή του νέου χάρτη χρήσεων γης. Στον Χάρτη 6 φαίνονται οι χρήσεις γης πριν την επανακατηγοριοποίηση. Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται όλοι οι κωδικοί κατά Corine 2018 που εμφανίζονται στην λεκάνη, το ποσοστό έκτασης που καλύπτουν και οι κατηγορίες του SWAT Land Use που επιλέγονται για την επανακατηγοριοποίηση. Ο Χάρτης 7 αποτελεί τον τελικό χάρτη χρήσεων γης του μοντέλου SWAT.



Χάρτης 6: Κάλυψη γης της περιοχής μελέτης κατά Corine 2018

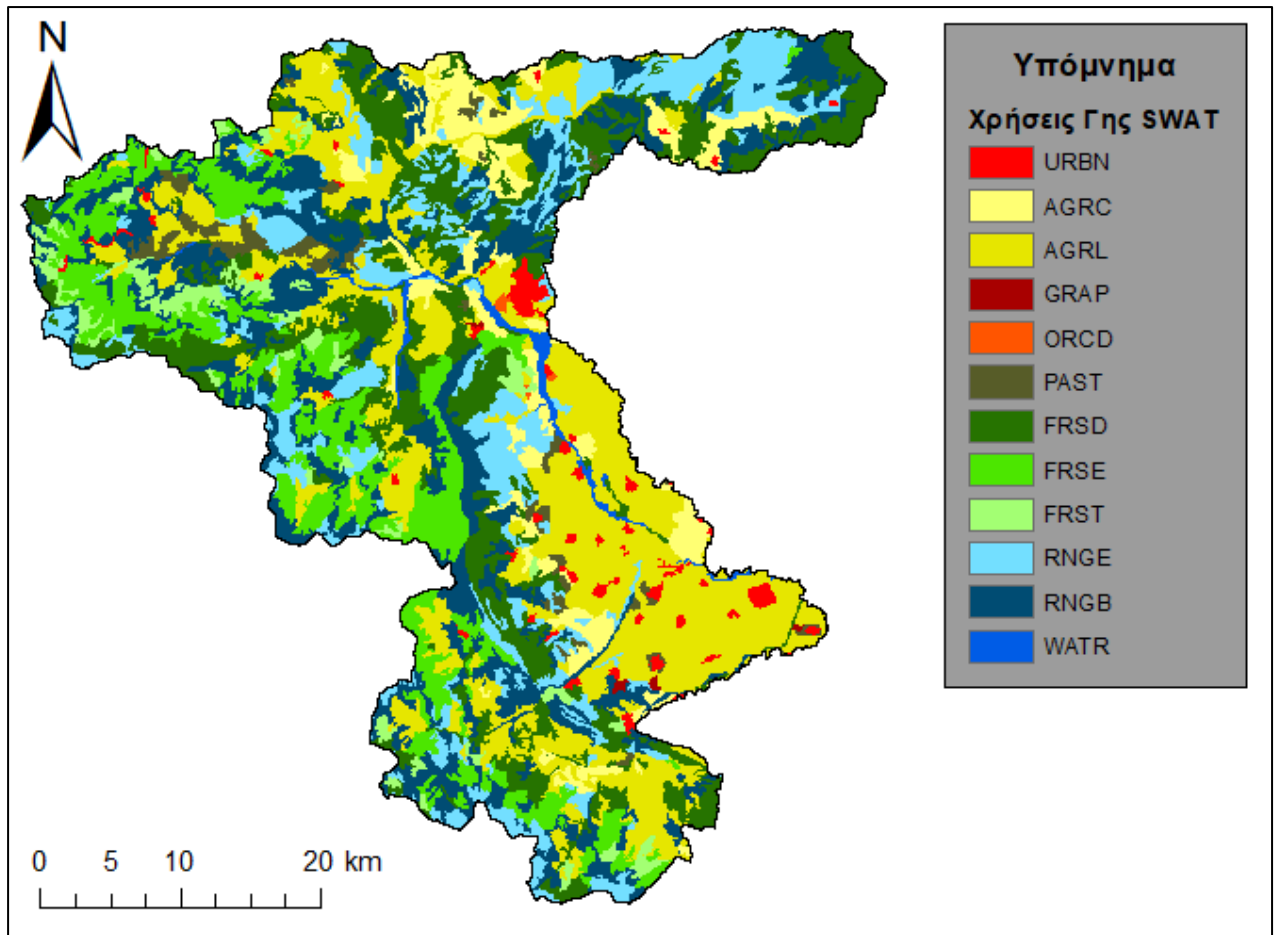
Πίνακας 17: Επανακατηγοριοποίηση χρήσεων γης

Κατηγορίες κατά Corine ¹	Corine 2018 Code	Area %	SWAT Land Use
Discontinuous urban fabric	112	1.25	
Industrial or commercial units	121	0.12	
Road and rail networks and associated land	122	0.09	URBN*
Construction sites	133	0.02	
Sport and leisure facilities	142	0.26	
Non-irrigated arable land	211	6.42	AGRC
Permanently irrigated land	212	10.6	AGRL
Vineyards	221	0.11	GRAP*
Fruit trees and berry plantations	222	0.06	ORCD*
Olive grooves	223	0.03	
Pastures	231	2.02	PAST
Complex cultivation patterns	242	1.99	
Land principally occupied by agriculture	243	12.69	AGRL
Broad-leaved forest	311	17.34	FRSD
Coniferous forest	312	12.01	FRSE
Mixed forest	313	3.22	FRST
Natural grassland	321	6.21	
Moors and heathland	322	0.78	RNGE
Sclerophyllous vegetation	323	5.59	
Transitional woodland shrub	324	15.54	
Beaches dunes and sand plains	331	0.26	
Bare rock	332	0.03	RNGB
Sparsely vegetated areas	333	2.37	
Burnt areas	334	0.02	
Inland marshes	411	0.14	
Water courses	511	0.82	WATR
Water bodies	512	0.02	

¹ Οι κατηγορίες χρήσεων γης με τα βασικά χαρακτηριστικά τους παρατίθενται και στα ελληνικά στο παράρτημα (πίνακας 38)

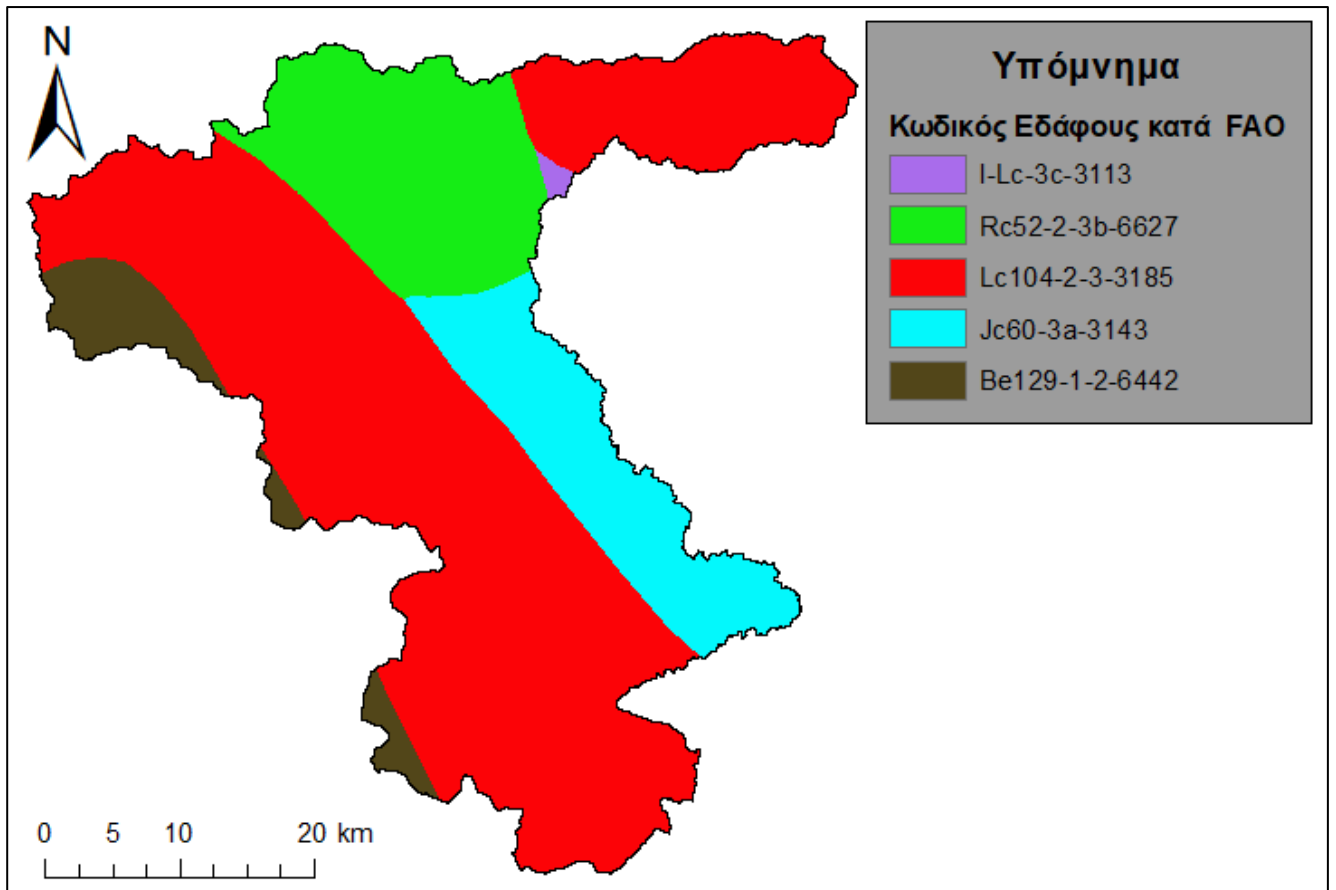
* Η κατηγορία URBN που αφορά τις αστικές περιοχές κατά την δημιουργία των HRU (μετά τον ορισμό των κατωφλιών) απαλείφεται λόγω πολύ μικρής έκτασης

* Οι κατηγορίες GRAP και ORCD που αφορούν δενδροειδής καλλιέργειες κατά την δημιουργία των HRU (μετά τον ορισμό των κατωφλιών) απαλείφονται λόγω πολύ μικρής έκτασης



Χάρτης 7: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης της λεκάνης στις χρήσεις γης του SWAT

Η αντίστοιχη διαδικασία για τους τύπους εδάφους δεν γίνεται χειροκίνητα όπως αυτή που περιεγράφηκε παραπάνω. Στην περίπτωση αυτή με την βοήθεια του λογισμικού Map Window γίνεται αντικατάσταση της βάσης δεδομένων των τύπων εδάφους του SWAT που ακολουθεί τα αμερικάνικα πρότυπα ώστε να περιέχει την παγκόσμια κατηγοριοποίηση του FAO Soil Database. Το MWSWAT 2012 είναι το ακριβές λογισμικό για την έκδοση του SWAT 2012 που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη. Πρόκειται για ένα ελεύθερο λογισμικό που είναι διαθέσιμο στην επίσημη ιστοσελίδα του SWAT. Για την κατηγοριοποίηση τους στο πρόγραμμα SWAT δημιουργείται και πάλι αρχείο .txt με την αντιστοίχιση των εδαφών και παράγεται ο νέος χάρτης (Χάρτης 8). Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται οι εδαφικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην λεκάνη και το ποσοστό της έκτασης που καταλαμβάνουν. Επιπλέον στους Πίνακες 19, 20 δίνονται ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά για την κάθε πρωτεύουσα και δευτερεύουσα κατηγορία εδάφους αντίστοιχα.



Χάρτης 8: Κατηγοριοποίηση εδαφικών σχηματισμών λεκάνης

Πίνακας 18: Εδαφικοί σχηματισμοί εντός της λεκάνης

Όνομα εδαφικού σχηματισμού κατά FAO	FAO Soil Code	Area %	Υδρολογική Κατηγορία
Lithosols*	I-Lc-3c-3113	0.29	C
Calcaric Regosols	Rc52-2-3b-6627	16.89	D
Chromic Luvisols	Lc104-2-3-3185	64.45	D
Calcaric Fluvisols	Jc60-3a-3143	13.22	D
Eutric Cambisols	Be129-1-2-6442	5.15	C

* Ο εδαφικός σχηματισμός απαλείφεται κατά την δημιουργία των HRU λόγω μικρής έκτασης

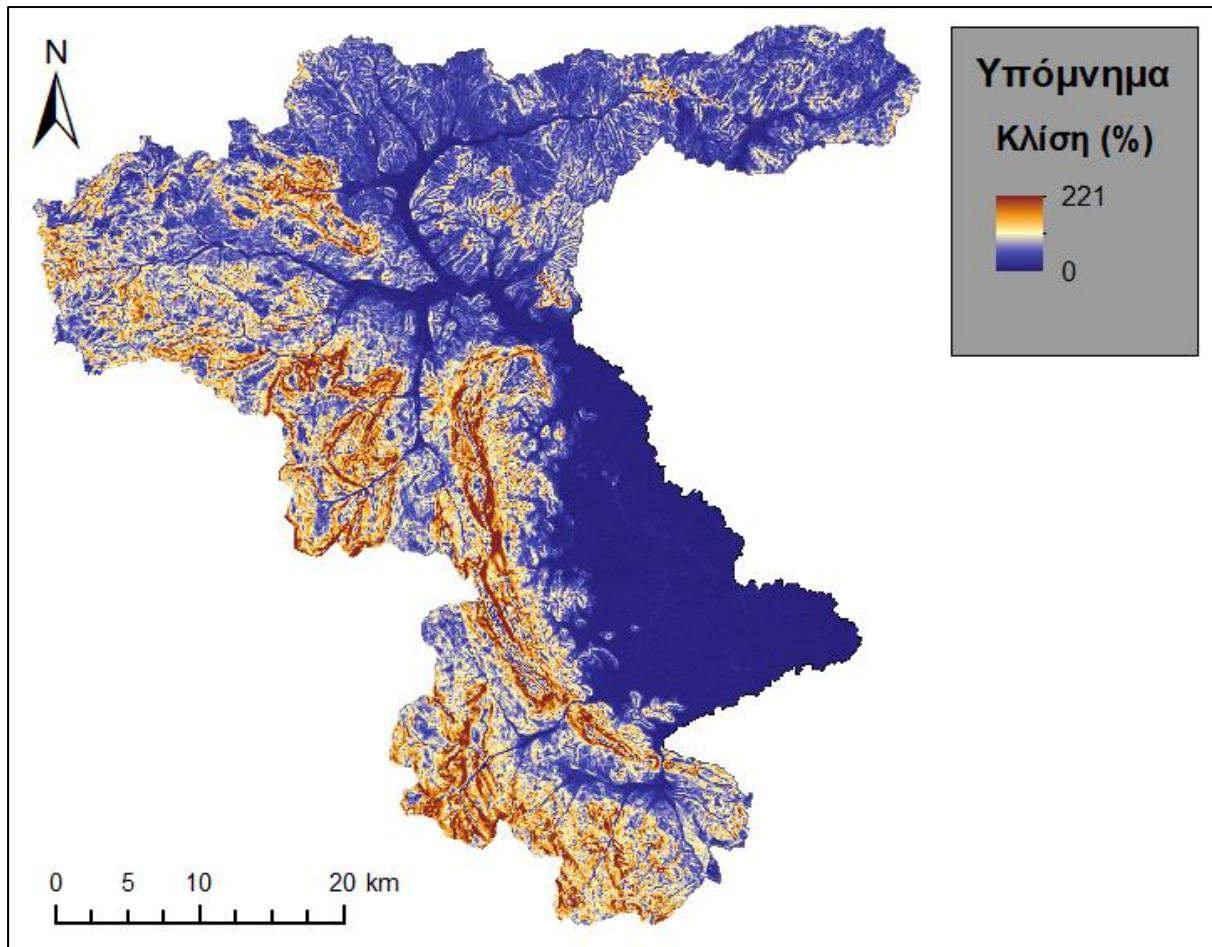
Πίνακας 19: Χαρακτηριστικά κύριων εδαφικών κατηγοριών που απαντώνται στην περιοχή μελέτης (πηγή: ΟΠΕΚΕΠΕ, 2015; <http://www.fao.org>)

Πρωτεύουσα Εδαφική Κατηγορία	Χαρακτηριστικά
Regosols	Χαλικώδη εδάφη ή εδάφη πλούσια σε αδρομερή υλικά. Έχουν σχηματιστεί από ψαθυρά αλλουβιακά υλικά ή θαλάσσια και λιμναία ιζήματα από χονδρόκοκκα υλικά. Χαρακτηρίζονται από την έλλειψη διαγνωστικού ορίζοντα.
Luvissols	Εδάφη με ισχυρή συσσώρευση αργίλου στον Β-ορίζοντα. Παρουσιάζουν ενδείξεις μετακίνησης αργιλλο-πυριτικών ορυκτών χωρίς υπερβολική έκπλυση βάσεων.
Fluvisols	Πρόσφατα αλλουβιακά εδάφη με μικρή ή καμία εδαφογενετική εξέλιξη. Το μητρικό υλικό είναι αδρανές με απουσία διαγνωστικών οριζόντων. Αρκετά από τα εδάφη της κατηγορίας αυτής χαρακτηρίζονται από κακή αποστράγγιση.
Cambisols	Εδάφη με μικρή ή μέτρια ανάπτυξη εδαφογενετικών οριζόντων. Αναπτύσσονται σε αυτόχθονα μητρικά υλικά ή σε αλλουβιακές αποθέσεις και χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική γονιμότητα.
Lithosols	Λεπτά σκληρά και βραχώδη πετρώματα.

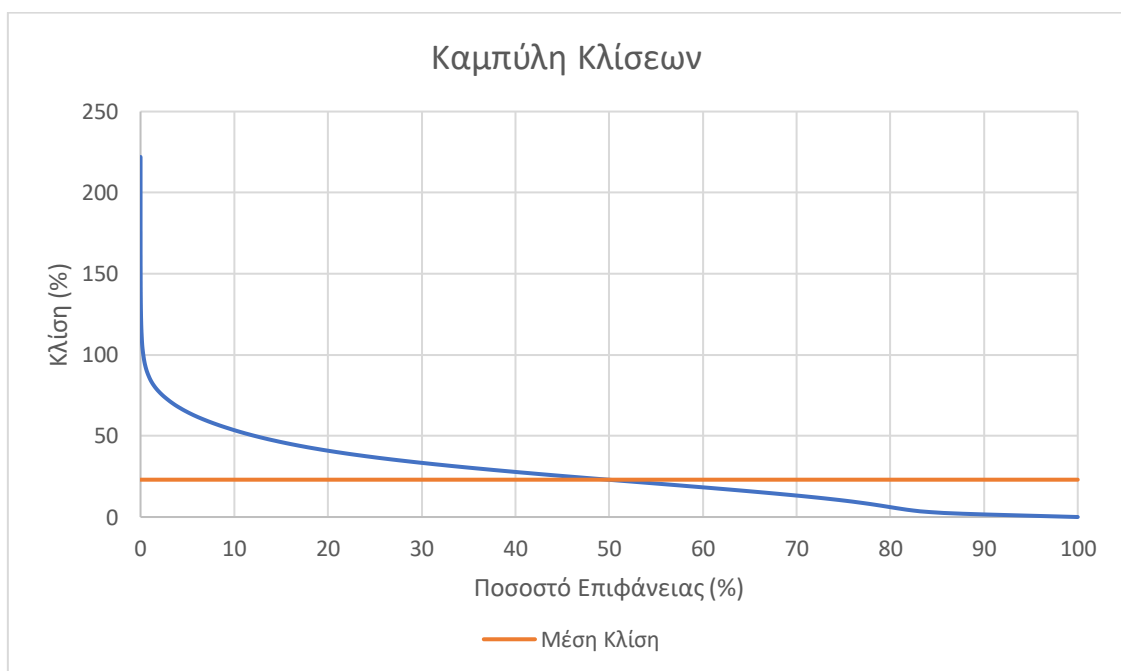
Πίνακας 20: Χαρακτηριστικά δευτερευόντων εδαφικών κατηγοριών που απαντώνται στην περιοχή μελέτης (πηγή: <http://www.fao.org>)

Δευτερεύουσα Εδαφική Κατηγορία	Χαρακτηριστικά
Calcaric	Εδάφη με ασβεστολιθικό χαρακτήρα
Chromic	Εδάφη με διαγνωστικό ορίζοντα με απόχρωση 7.5 YR της κατάταξης Munsell Hue (ή και πιο κόκκινο)
Eutric	Εδάφη με λόγο βασικού κορεσμού άνω του 50%

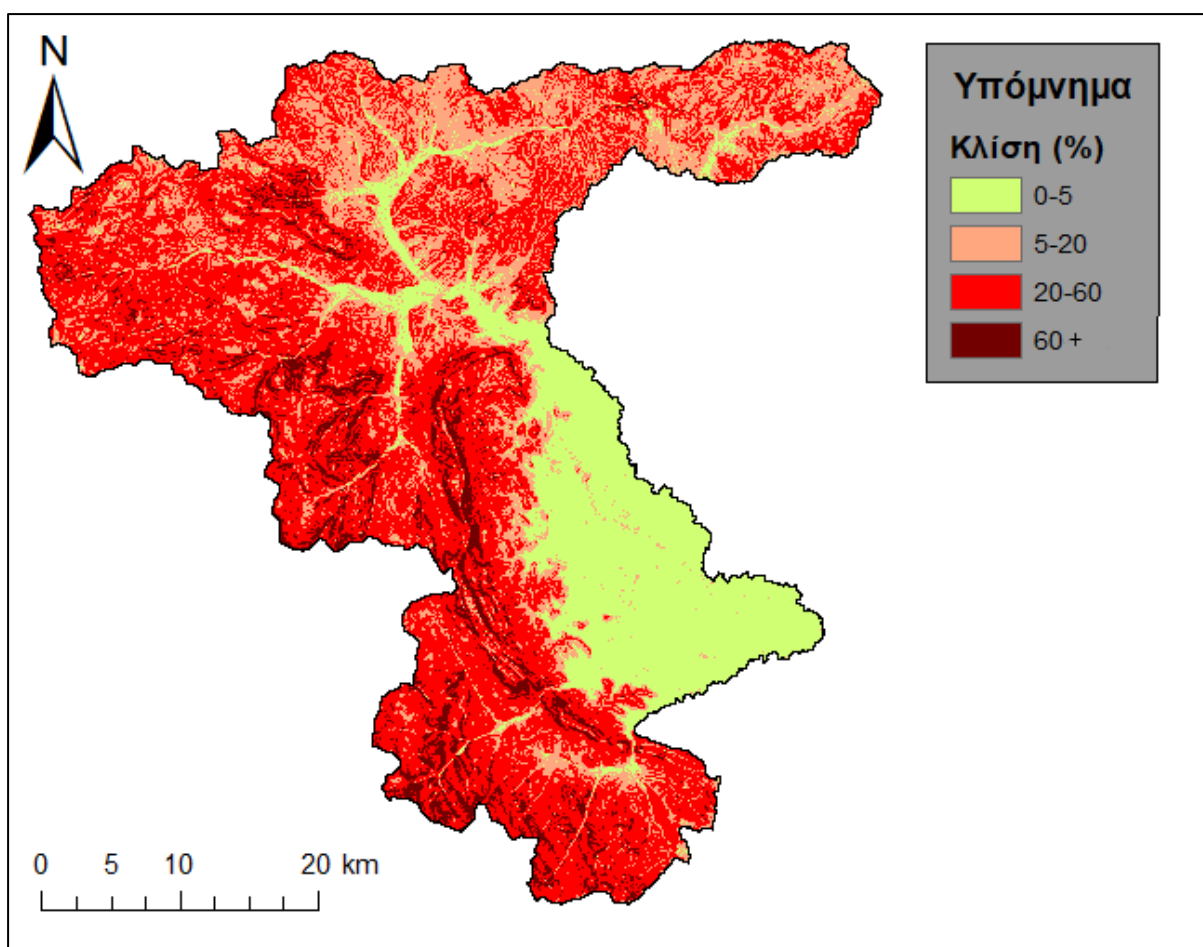
Το τρίτο και τελευταίο στοιχείο που χρειάζεται επανακατηγοριοποίηση είναι οι κλίσεις του εδάφους. Το εύρος των κλίσεων είναι συνεχές, έτσι στόχος είναι η ομαδοποίηση τους έτσι ώστε να αναπαριστούν όσο το δυνατόν όμοιες περιοχές σε συνάρτηση με την κίνηση του νερού μέσα από αυτές. Για το σκοπό αυτό απαραίτητη είναι η επίγνωση της μορφολογίας της περιοχής. Η περιοχή όπου βρίσκεται η λεκάνη ενδιαφέροντος αποτελείται από ένα μεγάλο εύρος κλίσεων καθώς πρόκειται για μία λεκάνη με ισχυρό το ορεινό στοιχείο, όπου απαντώνται μεγάλες κλίσεις, στα ανάντη, σε συνδυασμό με εκτενής πεδινές εκτάσεις στα κατόντη. Το αρχικό εύρος κλίσεων της περιοχής φαίνεται στον Χάρτη 9 μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη (Εικόνα 23) και η τελική κατηγοριοποίησή του στον Χάρτη 10.



Χάρτης 9: Χάρτης εύρους κλίσεων πριν την κατηγοριοποίηση



Εικόνα 23: Καμπύλη κλίσεων περιοχής μελέτης



Χάρτης 10: Τελική κατηγοριοποίηση κλίσεων λεκάνης

Οι τρεις χάρτες που προκύπτουν επικαλύπτονται και μετά μπορεί να γίνει ο καθορισμός των κατώφλιών (Πίνακας 21) για την δημιουργία των HRU στις οποίες θα χωριστεί ολόκληρη η λεκάνη.

Πίνακας 21: Ορισμός κατώφλιών για την δημιουργία των HRU

Παράμετρος	Κατώφλι
Χρήσεις Γης	10%
Τύπος Εδάφους	5%
Κλίση	5%

Επόμενο βήμα είναι ο εμπλουτισμός του μοντέλου με τα απαραίτητα μετεωρολογικά δεδομένα. Έχουν περιγραφεί ήδη στο υποκεφάλαιο 2.3.2 οι μετεωρολογικοί σταθμοί και τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Αυτά τα δεδομένα όπως και οι συντεταγμένες των σταθμών εισέρχονται στο μοντέλο με την μορφή αρχείων .txt. Κάθε αρχείο αφορά ένα τύπο δεδομένων ενός σταθμού. Επιπλέον χρειάζεται και ένα ξεχωριστό αρχείο που περιέχει τις συντεταγμένες, το υψόμετρο και τα ονόματα όλων των σταθμών. Όταν φορτωθούν αυτά στο μοντέλο επιλέγεται η εγγραφή των τελικών πινάκων στην βάση δεδομένων. Η προσομοίωση πραγματοποιείται για την περίοδο 1-1-1984 έως 31-12-2001. Η εμφάνιση των αποτελεσμάτων και η αξιολόγηση τους γίνεται σε μηνιαίο βήμα. Για την προθέρμανση του μοντέλου επιλέγεται μία περίοδος 3 ετών.

3.3.3 Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου Πηνειού

Όπως έχει αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 3.2.2 κάθε μοντέλο αφότου κατασκευαστεί πρέπει να βαθμονομηθεί με την βοήθεια μετρήσεων πεδίου για παρόμοιες συνθήκες, ώστε τα αποτελέσματα του να είναι αποδεκτά και η προσομοίωση να προσεγγίζει την πραγματικότητα όσον το δυνατόν καλύτερα.

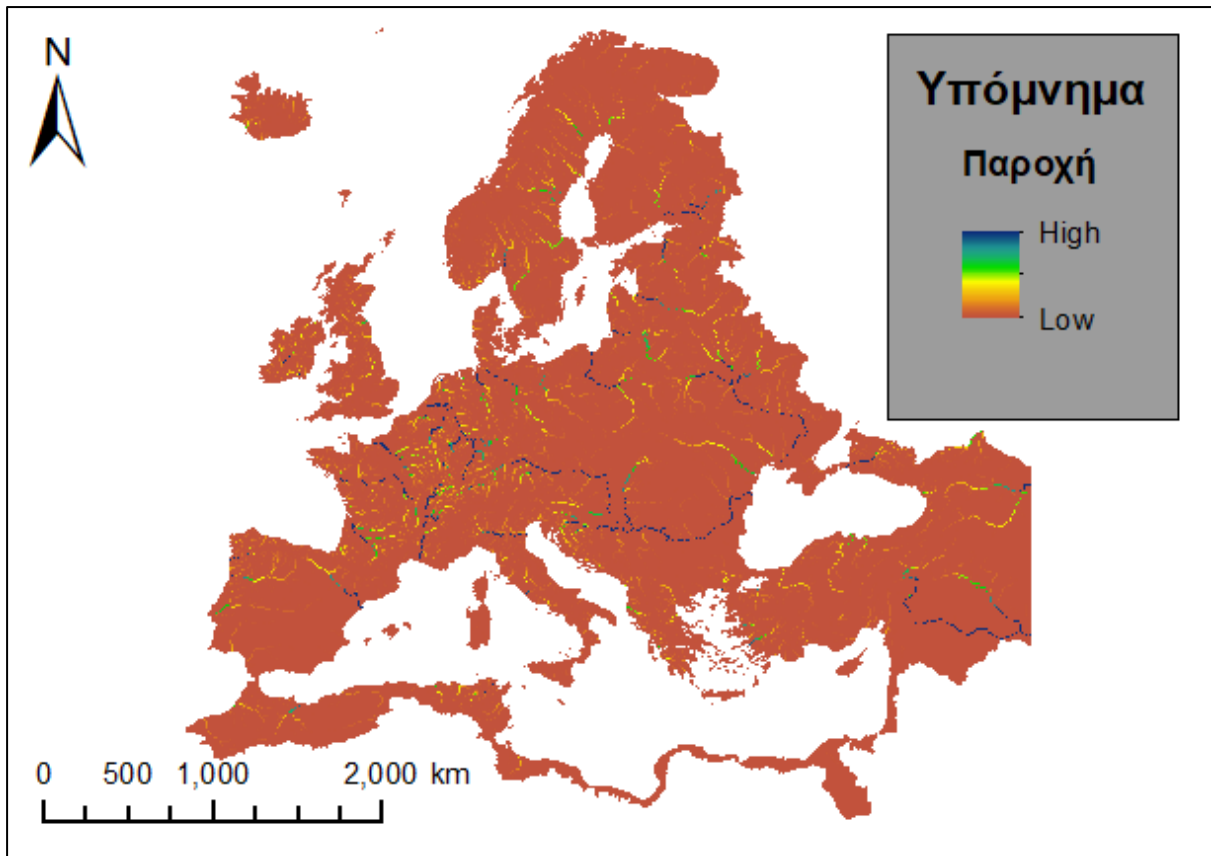
3.3.3.1 Εύρεση μετρήσεων πεδίου

Στην Ελλάδα οι υπηρεσίες που πραγματοποιούν υδρομετρήσεις σε ποταμούς ποικίλουν ωστόσο σχεδόν στο σύνολο τους τα δεδομένα είτε δεν είναι διαθέσιμα στο κοινό, είτε δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Συγκεκριμένα στην λεκάνη του Πηνειού αν και υπάρχει πυκνό δίκτυο υδρομετρικών σταθμών για την μέτρηση των παροχών των κύριων υδατορεμάτων και των πηγών, πολλοί από αυτούς δεν έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια και τα δεδομένα που υπάρχουν είναι συχνά σε δύσκολα επεξεργάσιμη μορφή (Κουτσογιάννης κ.α., 2008).

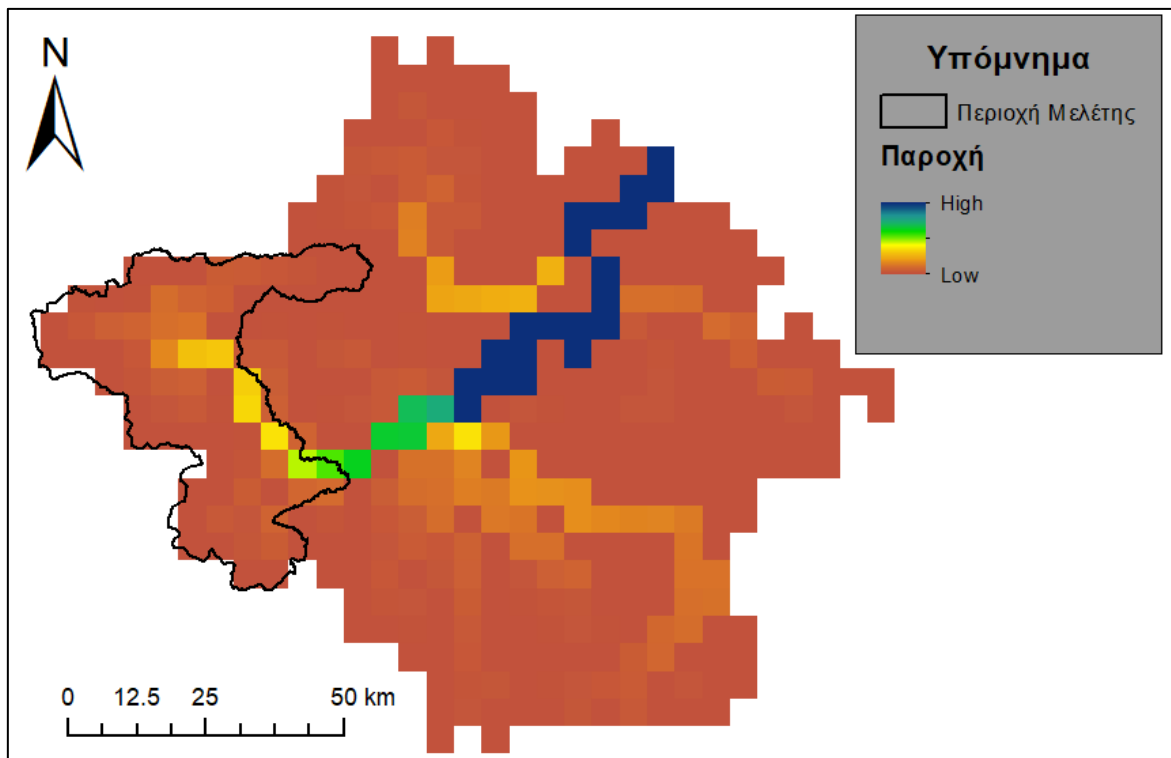
Σύμφωνα με διερεύνηση της Κ/Ξ Διαχείρισης Υδάτων Κεντρικής & Δυτικής Ελλάδας το έτος 2005 πολλοί από τους υδρομετρικούς σταθμούς που θεωρούνταν αξιόπιστοι παρουσίασαν σημαντική υποβάθμιση λόγω της κατασκευής πολλών μικρών φραγμάτων κοντά σε αυτούς για την απόληψη νερού για την κάλυψη των τοπικών αρδευτικών αναγκών. Συνεπώς η κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου των περιοχών αυτών καθίσταται σχεδόν αδύνατη (Κουτσογιάννης κ.α., 2008). Τα παραπάνω στοιχεία δικαιολογούν τελικά την έλλειψη μετρήσεων πεδίου για την παροχή των κύριων υδατορεμάτων ώστε να πραγματοποιηθεί σωστά η βαθμονόμηση του μοντέλου. Η μόνη πηγή πληροφορίας για να γίνει αξιολόγηση του μοντέλου είναι τα αποτελέσματα που παρέχονται από το JRC με χρήση του μοντέλου LISFLOOD.

Τα δεδομένα αυτά είναι ελεύθερα μέσω της ιστοσελίδας του “Copernicus Land Monitoring Service” από το έτος 1991 έως σήμερα. Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό τα πρώτα χρόνια της προσομοίωσης δεν μπορούν να συγκριθούν, συνεπώς αξιολογείται μία χρονοσειρά 11 ετών από το 1991 έως και το 2001. Τα δεδομένα αυτά παρέχονται σε μορφή κανάβου διάστασης 5x5 km και καλύπτουν ολόκληρη την έκταση της Ευρώπης (Χάρτης 11). Όπως και για τους υπόλοιπους χάρτες γίνεται η προετοιμασία του ώστε να κοπεί στα όρια της λεκάνης απορροής (Χάρτης 12). Οι εκτιμήσεις των παροχών παρέχονται σε ημερήσιο βήμα και αντλούνται από το raster αρχείο μέσω του προγράμματος QGIS. Η σύγκριση ωστόσο επιλέγεται να γίνει σε μηνιαίο βήμα χρησιμοποιώντας την μέση ημερήσια τιμή της παροχής του μήνα.

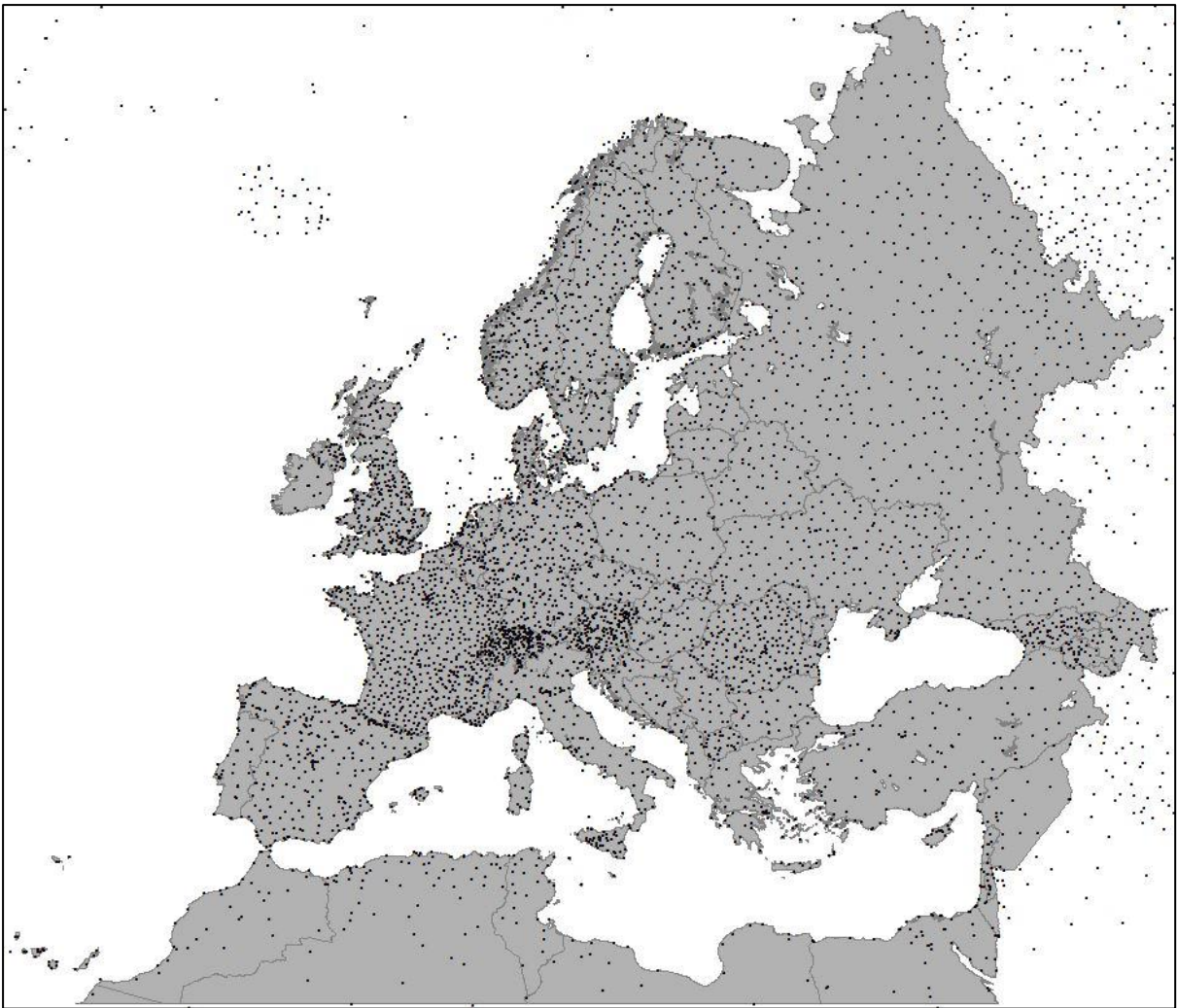
Τα μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία χρησιμοποιούνται ως δεδομένο εισόδου στο μοντέλο LISFLOOD λαμβάνονται από την βάση δεδομένων “JRC MARS Meteorological Database”. Η βάση δεδομένων διαθέτει δεδομένα μετεωρολογικών σταθμών τα οποία με χωρική παρεμβολή δημιουργούν ένα κανάβο ακρίβειας 25x25 km για μία περίοδο από το 1979 μέχρι το τελευταίο ολοκληρωμένο έτος και για όλη την Ευρωπαϊκή Ένωση και τις γείτονες χώρες (Food Security Unit; Joint Research Centre, 2021). Ο αριθμός των επίγειων σταθμών του δικτύου παρατήρησης της βάσης δεδομένων ξεπερνά τους 10,000 σε πάνω από 40 χώρες. Στην Εικόνα 24 φαίνεται η χωρική κατανομή των σταθμών αυτών και στην Εικόνα 24 το δίκτυο εντός του ελλαδικού χώρου. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι εντός του ελλαδικού χώρου οι «κουκίδες» που αντιπροσωπεύουν τους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι πολύ λίγες σε σχέση με άλλες περιοχές της Ευρώπης.



Χάρτης 11: Κάναβος παροχών για την Ευρώπη και τα παράλια της Μεσογείου (πηγή: Copernicus Land Monitoring Service, 2021)



Χάρτης 12: Κάναβος παροχών κομμένο στα όρια της λεκάνης του Πηνειού ((πηγή: Copernicus Land Monitoring Service, 2021)



Εικόνα 24: Δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών της JRC MARS Meteorological Database για το 2020 (πηγή: JRC, 2021)



Εικόνα 25: Δίκτυο εντός του ελλαδικού χώρου (πηγή: JRC, 2021)

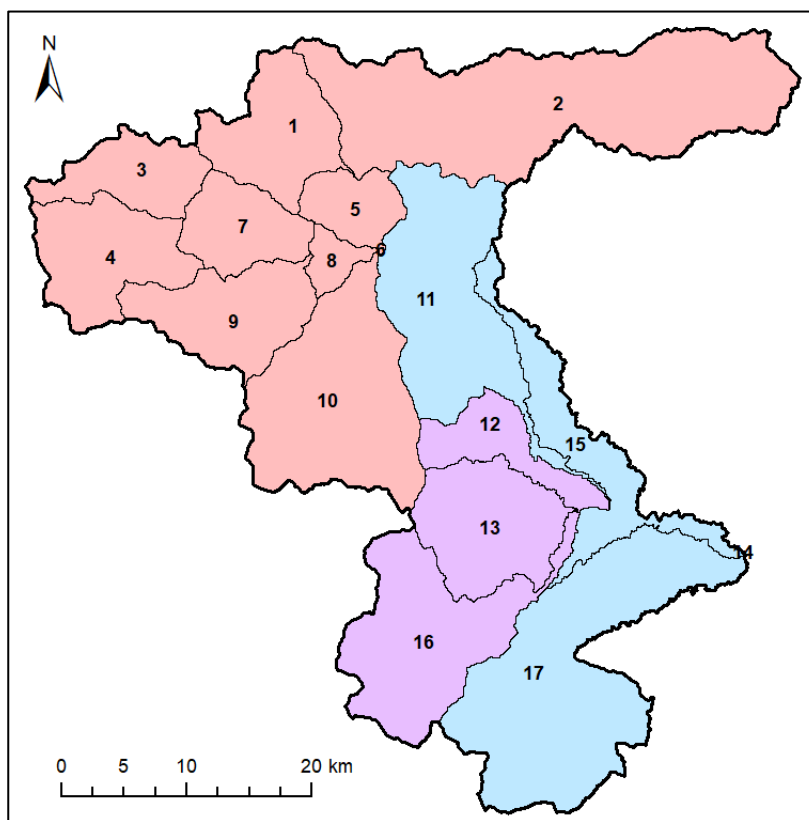
Συνδυαστικά με τα παραπάνω στοιχεία στο πλαίσιο της εργασίας χρησιμοποιούνται και δεδομένα μέσω ετήσιων απορροών σε 4 θέσεις εντός της λεκάνης σύμφωνα με το Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων (Κουτσογιάννης κ.α., 2008). Για αυτά χρησιμοποιείται το άθροισμα των ημερήσιων παροχών για όλα τα έτη της προσομοίωσης το οποίο ανάγεται σε όγκο απορροής και διαιρείται με τα έτη. Έτσι προκύπτει το ζητούμενο μέγεθος που είναι ο μέσος όγκος απορροής.

3.3.3.2 Επιλογή θέσεων ελέγχου

Για την βαθμονόμηση του μοντέλου SWAT επιλέγονται 3 θέσεις ενδιαφέροντος στις οποίες γίνεται η σύγκριση των διαθέσιμων και προσομοιωμένων χρονοσειρών. Με τον τρόπο αυτό ομαδοποιούνται οι υπολεκάνες (Χάρτης 13) και διευκολύνεται η επεξεργασία των παραμέτρων του μοντέλου. Οι χρονοσειρές που συγκρίνονται λαμβάνονται στην έξοδο ή είσοδο της πιο κοντινής υπολεκάνης κάθε φορά, ενώ η χρονοσειρά παροχών του JRC επιλέγεται από το αντίστοιχο εικονοστοιχείο του χάρτη. Στον Πίνακα 22 αντιστοιχίζονται οι θέσεις ελέγχου με τις ανάντη υπολεκάνες του SWAT που αφορούν και με το σημείο από όπου λαμβάνεται η προσομοιωμένη χρονοσειρά. Στον Χάρτη 14 παρουσιάζονται τα εικονοστοιχεία από τα οποία λαμβάνονται οι χρονοσειρές των παροχών του JRC.

Πίνακας 22: Σημεία ελέγχου SWAT

Σημείο	Χρονοσειρά SWAT	Υπολεκάνες που βαθμονομούνται
Καλαμπάκα	Είσοδος υπολεκάνης 11	1-10
Πύλη	Έξοδος υπολεκάνης 12	12,13,16
Τρίκαλα (Έξοδος)	Έξοδος υπολεκάνης 14	11,14,15,17

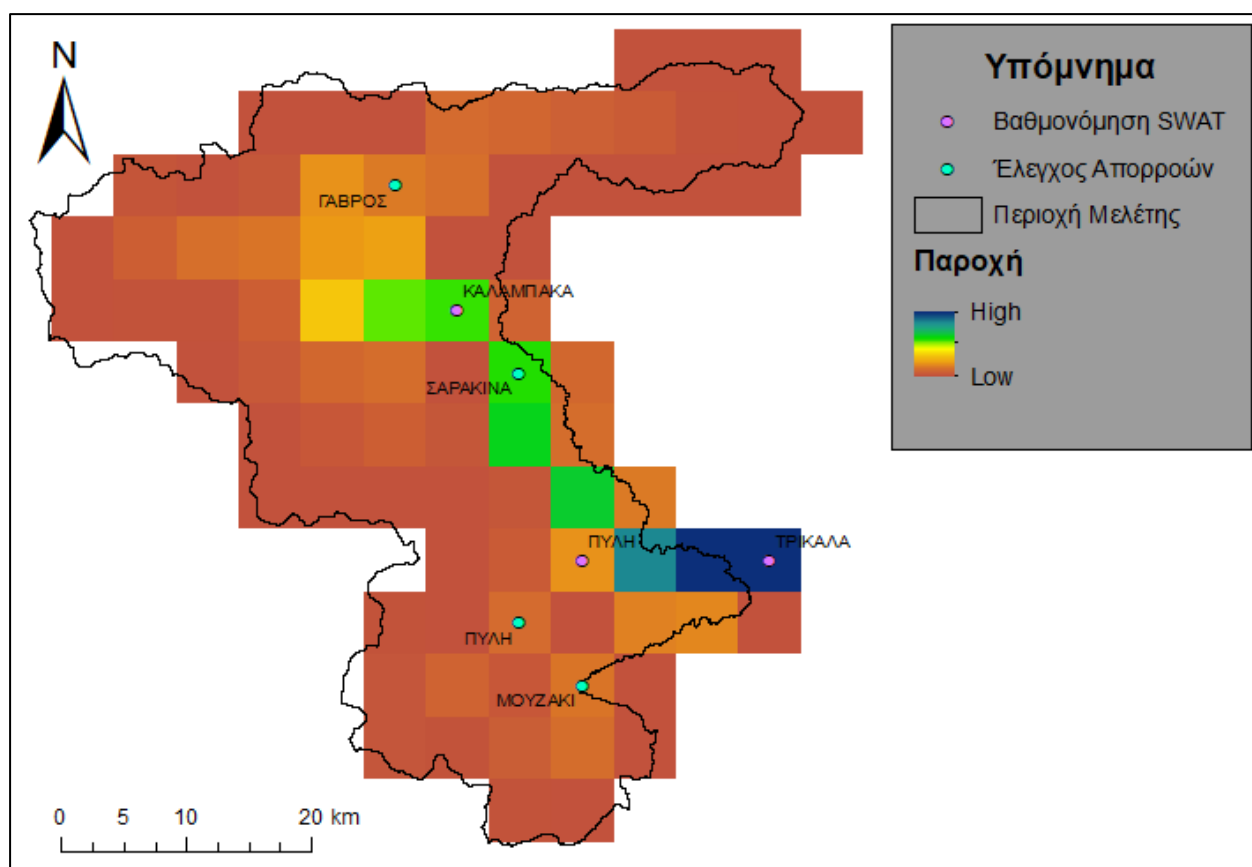


Χάρτης 13: Ομαδοποίηση υπολεκανών κατά την βαθμονόμηση

Μετά την βαθμονόμηση για την σύγκριση της προσομοίωσης με τις διαθέσιμες ετήσιες απορροές οι θέσεις ελέγχου είναι διαφορετικές και επιλέγονται σύμφωνα με τα σημεία που εντοπίζονται οι μετρήσεις. Αυτά πινακοποιούνται αντιστοίχως (Πίνακας 23) και εντοπίζονται γεωγραφικά στον Χάρτη 14.

Πίνακας 23: Υπολεκάνες σύγκρισης απορροών

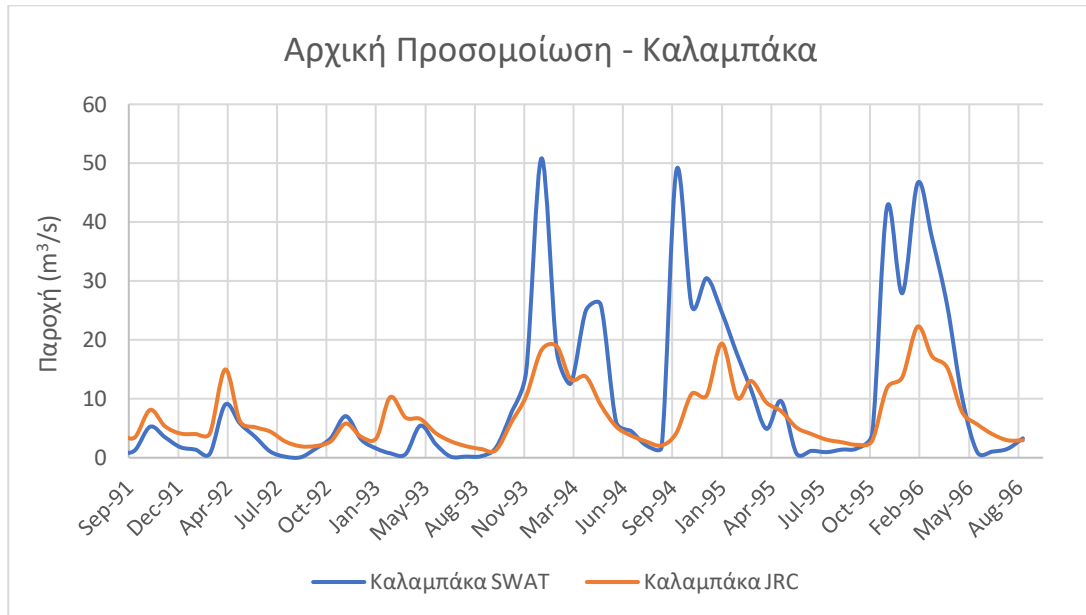
Υπολεκάνη	Χρονοσειρά SWAT
Γάβρος	Έξοδος υπολεκάνης 2
Πύλη	Έξοδος υπολεκάνης 16
Μουζάκι	Έξοδος υπολεκάνης 17
Σαρακίνα	Έξοδος υπολεκάνης 11



Χάρτης 14: Εικονοστοιχεία του αρχείου JRC που επιλέγονται για την βαθμονόμηση και τον έλεγχο των απορροών

Πριν ξεκινήσει η βαθμονόμηση, γίνεται μία πρώτη προσομοίωση και σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων που θέτει το SWAT στο μοντέλο. Στις Εικόνες 26-28 δίνονται τα διαγράμματα των χρονοσειρών των δύο μοντέλων για την περίοδο της βαθμονόμησης. Από τα διαγράμματα αυτά, παρατηρείται κατ' αρχάς η ύπαρξη της εποχικότητας εντός του υδρολογικού έτους καθώς και ότι η επιλεγμένη περίοδος μπορεί εύκολα να χωριστεί σε υγρά και ξηρά έτη. Και για τις τρεις θέσεις ελέγχου κατά τα πρώτα 2 χρόνια της προσομοίωσης (από Σεπτέμβριο του 1991 έως το Σεπτέμβριο του 1993) οι παροχές είναι μικρές σε σχέση με τα υπόλοιπα έτη. Στην περίοδο αυτή των ξηρών ετών φαίνεται ότι σε πολλές περιπτώσεις το μοντέλο SWAT δίνει μηδενικές ή σχεδόν μηδενικές παροχές κάτι που υποδηλώνει έλλειψη ροής στο ποτάμι. Το γεγονός αυτό δεν μπορεί εύκολα να ισχύει σε μεγάλες λεκάνες απορροής όπως η Καλαμπάκα και τα Τρίκαλα. Το μοντέλο

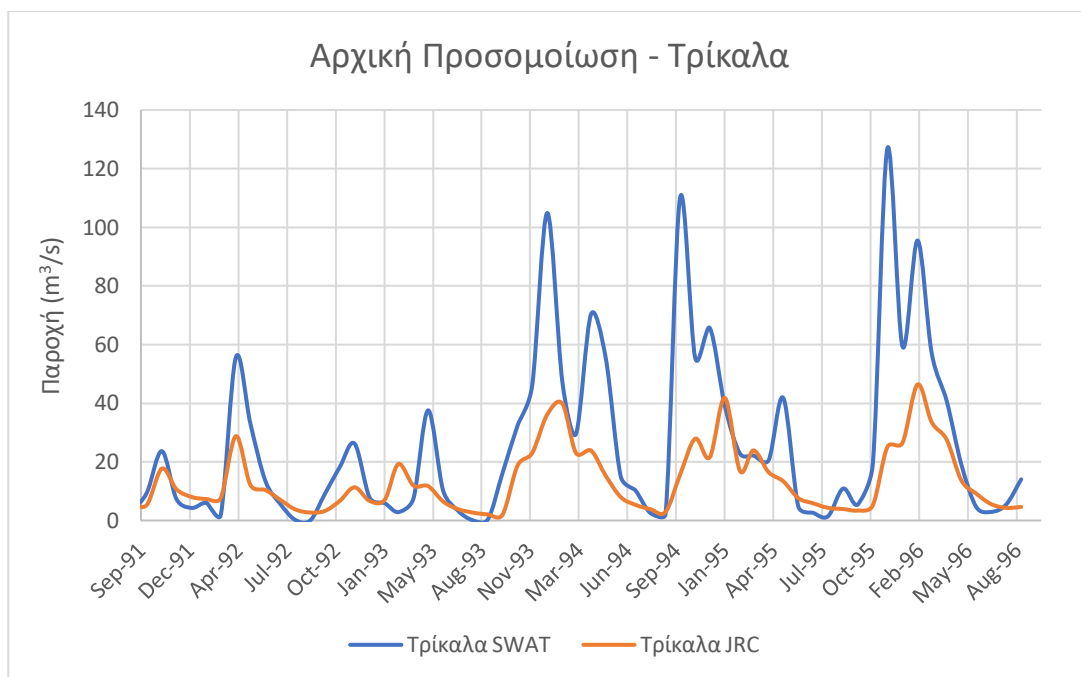
LISFLOOD αντιθέτως διατηρεί μία βασική απορροή και σε πολύ λίγες περιπτώσεις η παροχές μηδενίζονται πρακτικά. Όσον αφορά τα υγρά έτη της προσομοίωσης τα τοπικά ακρότατα των μοντέλων συμφωνούν χρονικά με το μοντέλο SWAT να δίνει αρκετά μεγαλύτερες παροχές. Οι μεγαλύτερες ασυμφωνίες των δύο προς εξέταση μοντέλων αφορούν τον έλεγχο στην περιοχή της Πύλης η οποία είναι και η μικρότερη λεκάνη από τις τρεις. Ενδεικτικά τα εύρη τιμών για κάθε μοντέλο στα υγρά και στα ξηρά έτη δίνονται στον Πίνακα 24.



Εικόνα 26: Σύγκριση αρχικής προσομοίωσης με την χρονοσειρά του LISFLOOD στην περιοχή της Καλαμπάκας



Εικόνα 27: Σύγκριση αρχικής προσομοίωσης με την χρονοσειρά του LISFLOOD στην περιοχή της Πύλης



Εικόνα 28: Σύγκριση αρχικής προσομοίωσης με την χρονοσειρά του LISFLOOD στην περιοχή των Τρικάλων

Πίνακας 24: Εύρη μέσων ημερήσιων παροχών του μήνα για τα δύο μοντέλων πριν την βαθμονόμηση

Θέση Ελέγχου	Εύρος Παροχών SWAT (m ³ /s)		Εύρος Παροχών JRC (m ³ /s)	
	Ξηρά Έτη (9/1991-9/1993)	Υγρά Έτη (10/1993-9/1996)	Ξηρά Έτη (9/1991-9/1993)	Υγρά Έτη (10/1993-9/1996)
Καλαμπάκα	0.08 - 9.01	0.71 - 50.83	1.48 - 14.98	1.29 - 22.25
Πύλη	0.80 - 11.75	0.52 - 25.20	0.24 - 4.34	0.25 - 6.96
Τρίκαλα	0.05 - 55.65	1.45 - 126.90	2.07 - 28.79	1.94 - 46.40

3.3.3.3 Παράμετροι προς επεξεργασία

Για τους στόχους της παρούσας εργασίας, η βαθμονόμηση λαμβάνει χώρα μόνο για τον έλεγχο και σύγκριση της ροής εντός της λεκάνης. Οι παράμετροι λοιπόν, που επεξεργάζονται είναι αυτοί που επηρεάζουν την απορροή. Αυτοί χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες αναλόγως του πίνακα στον οποίον εντάσσονται και τον τρόπο που επηρεάζουν το υδατικό ισοζύγιο. Οι προς επεξεργασία παράμετροι επιλέγονται με βάση πίνακες από την βιβλιογραφία και από δημοσιευμένες εργασίες που αντλούνται από την βιβλιοθήκη του SWAT (SWAT Literature Database for Peer-Reviewed Journal Articles), και από άλλες αντίστοιχες εργασίες.

Οι συντελεστές, που τελικά επεξεργάζονται για την βαθμονόμηση, μαζί με τον ορισμό και τον πίνακα στον οποίον αντιστοιχούν φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 25. Στο παράρτημα δίνονται οι πίνακες σύμφωνα με τους οποίους επιλέγονται οι αριθμητικές τιμές μερικών εκ των παραμέτρων (Εικόνες 51-54).

Πίνακας 25: Παράμετροι που συμμετέχουν στην βαθμονόμηση (πηγή: Arnold, 2012)

Πίνακας	Παράμετρος	Ορισμός	Μονάδες
.mgt	CN2	Τιμή αριθμού καμπύλης επιφανειακής απορροής κατά SCS για συνθήκες υγρασίας τύπου II	Αδιάστατο
.sol	SOL_AWC (layer1)	Διαθέσιμη χωρητικότητα νερού στην πρώτη εδαφική στρώση	mm H ₂ O/mm εδάφους
	ALPHA_BF	Συντελεστής βασικής ροής	1/days
	GW_DELAY	Χρόνος υστέρησης του υπόγειου νερού	days
	GWQMN	Κάτω όριο βάθους νερού στον αβαθή υδροφορέα για την πραγματοποίηση της ροής επιστροφής	mm H ₂ O
.gw	GW_REVAP	Συντελεστής κίνησης του υπόγειου νερού από τα χαμηλότερα στα ψηλότερα εδαφικά στρώματα	Αδιάστατο
	RCHRG_DP	Ποσοστό διήθησης στον υπόγειο υδροφορέα	Αδιάστατο
	REVAPMN	Κάτω όριο βάθους νερού στον αβαθή υδροφορέα για να πραγματοποιηθεί η κίνηση ή διήθηση του στον υπόγειο υδροφορέα	mm H ₂ O
.hru	ESCO	Συντελεστής αντιστάθμισης εδαφικής εξάτμισης	Αδιάστατο
.rte	CH_N(2)	Συντελεστής Manning στο υδατόρεμα	Αδιάστατο

4. Αποτελέσματα

4.1 Τελικές τιμές παραμέτρων και αποτελέσματα βαθμονόμησης

Οι τελικές τιμές των παραμέτρων μεταβάλλονται πολλές φορές μέχρι να βελτιωθούν οι στατιστικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται στην διαδικασία της βαθμονόμησης. Στη βιβλιογραφία δίνονται τα εύρη τιμών για κάθε έλεγχο, ώστε το αποτέλεσμα να μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικό. Στον πίνακα 26 εμφανίζονται συγκεντρωτικά τα όρια αυτά για κάθε έναν στατιστικό έλεγχο. Αξίζει να σημειωθεί οι έλεγχοι αυτοί αξιοποιούνται κυρίως στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Στην παρούσα εργασία αυτό δεν κατέστη εφικτό, έτσι τα αποτελέσματα του LISFLOOD είναι αυτά που χρησιμοποιούνται ως βάση της βαθμονόμησης. Για τον λόγο αυτό, οι τιμές των στατιστικών ελέγχων τελικά δεν μπορούν να θεωρηθούν απολύτως αξιόπιστοι για τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.

Πίνακας 26: Βαθμολογία απόδοσης στατιστικών ελέγχων (πηγή: D. N. Moriasi et al., 2007)

Έλεγχος	Πολύ Καλή	Καλή	Ικανοποιητική	Μη Ικανοποιητική
NSE	> 0.75	> 0.65	> 0.50	≤ 0.50
R ²			> 0.50	≤ 0.50
PBIAS (%)	< ±10	< ±15	< ±25	≥ ±25

Μετά από επαναλήψεις και μεταβολές των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν παρουσιάζονται οι αρχικές τιμές που ορίζει το πρόγραμμα και οι τελικές τιμές που προέκυψαν κατά την προσπάθεια βελτιστοποίησης των ελέγχων στην φάση της βαθμονόμησης (πίνακες 27-29).

Πίνακας 27: Επεξεργασία .mgt

Χρήση γης	Αρχικό εύρος τιμών CN2	Τελικό εύρος τιμών CN2
AGRC	84	65 - 75
AGRL	83 - 87	67 - 78
PAST	84	72
FRSD	77 - 83	45 - 65
FRSE	70 - 77	45 - 60
FRST	73 - 79	60
RNGE	79 - 84	55 - 72
RNGB	74 - 80	55 - 65
WATR	92	92

Πίνακας 28: Επεξεργασία .sol

Εδαφικός Σχηματισμός	Αρχική τιμή SOL_AWC	Τελικό εύρος τιμών SOL_AWC
Eutric Cambisols	0.143	0.18 - 0.21
Calcaric Fluvisols	0.17	0.15 - 0.19
Chromic Luvisols	0.116	0.15 - 0.19
Calcaric Regosols	0.147	0.12 - 0.16

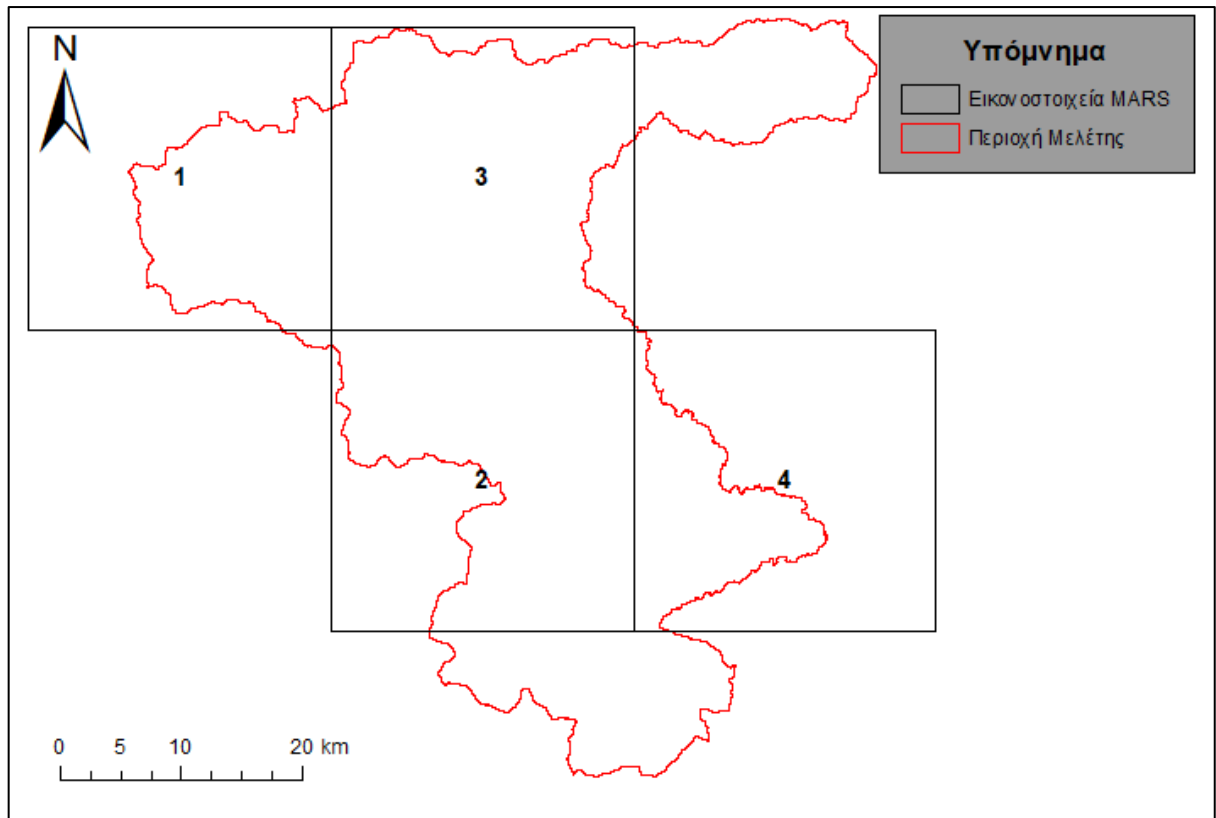
Πίνακας 29: Επεξεργασία .gw, .rte, .hru

Παράμετρος	Αρχική τιμή	Τελικό Εύρος
ALPHA_BF	0.048	0 - 0.8
GW_DELAY	31	65
GWQMN	1000	2000
GW_REVAP	0.02	0.05 - 0.1
RCHRG_DP	0.05	0.1 - 0.5
REVAPMN	750	300 - 750
CH_N2	0.014	0.04 – 0.06
ESCO	0.95	0.4 – 0.75

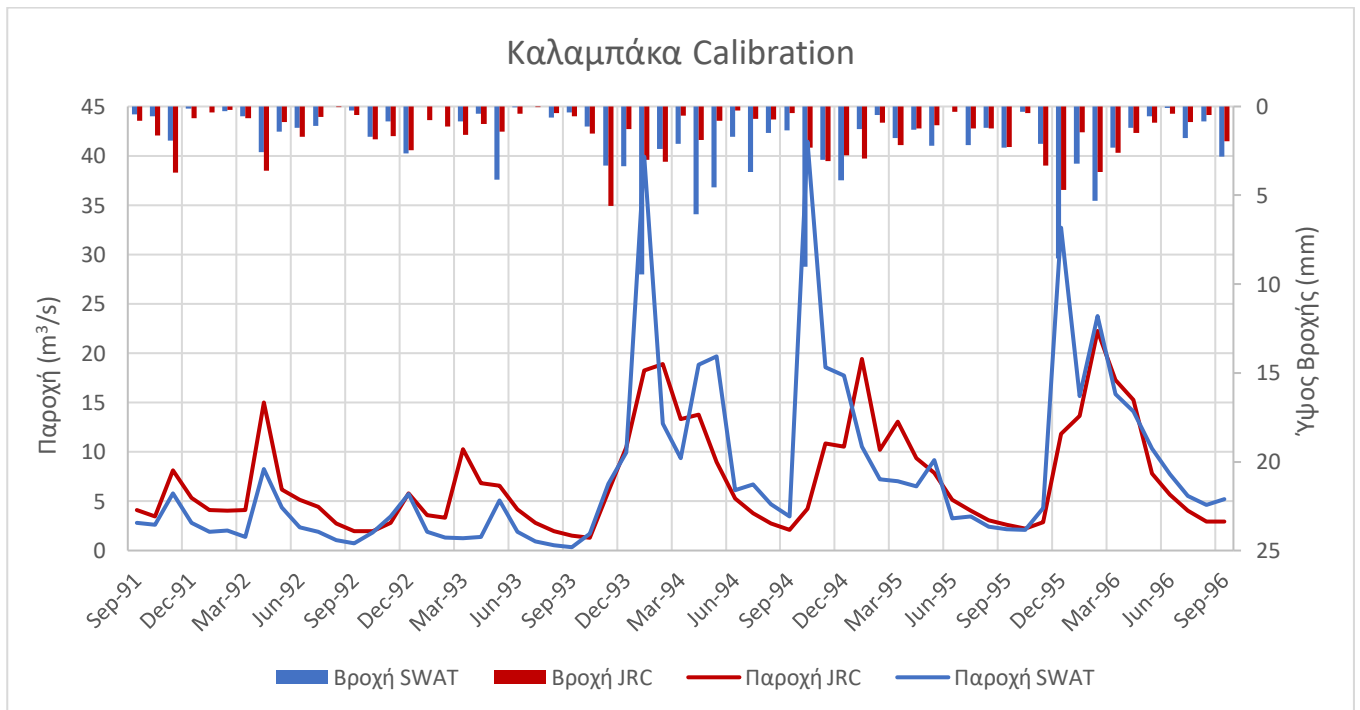
Η χρονοσειρά που χρησιμοποιείται κατά την βαθμονόμηση αφορά μία περίοδο 5 ετών από τον Σεπτέμβριο του 1991 έως και τον Σεπτέμβριο του 1996. Στις Εικόνες 29-31 φαίνεται, για κάθε μία από τις τρεις θέσεις ελέγχου, η μέση ημερήσια χρονοσειρά παροχής του μήνα του μοντέλου LISFLOOD, η αντίστοιχη χρονοσειρά του μοντέλου SWAT, μετά το πέρας της βαθμονόμησης, και τέλος κατά προσέγγιση η βροχόπτωση που εφαρμόζεται σε κάθε μοντέλο.

Για την οπτικοποίηση της βροχής στο διάγραμμα λαμβάνονται αρχικά για το μοντέλο SWAT οι τιμές που αναγράφονται στον πίνακα .sub, ο οποίος αποτελεί έναν από τους πίνακες εξόδου της προσομοίωσης. Οι τιμές του πίνακα αφορούν την συνολική μηνιαία βροχή για κάθε υπολεκάνη η οποία ανάγεται σε μέση ημερήσια κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Στην προκειμένη περίπτωση λόγω του μικρού αριθμού σταθμών που εισέρχονται στο μοντέλο, πολλές υπολεκάνες λαμβάνουν ίδιες χρονοσειρές βροχής. Συγκεκριμένα, οι υπολεκάνες με βάση την βροχή που αντιστοιχεί σε αυτές, χωρίζονται σε τρεις ομάδες, η πρώτη αποτελείται από τις υπολεκάνες 1-9 και 11, η δεύτερη από τις υπολεκάνες 10, 12, 13, 16, 17 και τέλος η τρίτη από τις υπολεκάνες 14, 15. Τελικά, η βροχή που επιλέγεται για να παρουσιαστεί στα διαγράμματα της Καλαμπάκας και της Πύλης λαμβάνεται από την βροχή που αφορά τις περισσότερες εκ των ανάντη υπολεκανών, ενώ για την έξοδο λαμβάνονται οι συνολικές τιμές κατακρήμνισης εντός της λεκάνης που προκύπτει από την σχετική αναφορά, προϊόν της προσομοίωσης (output.std).

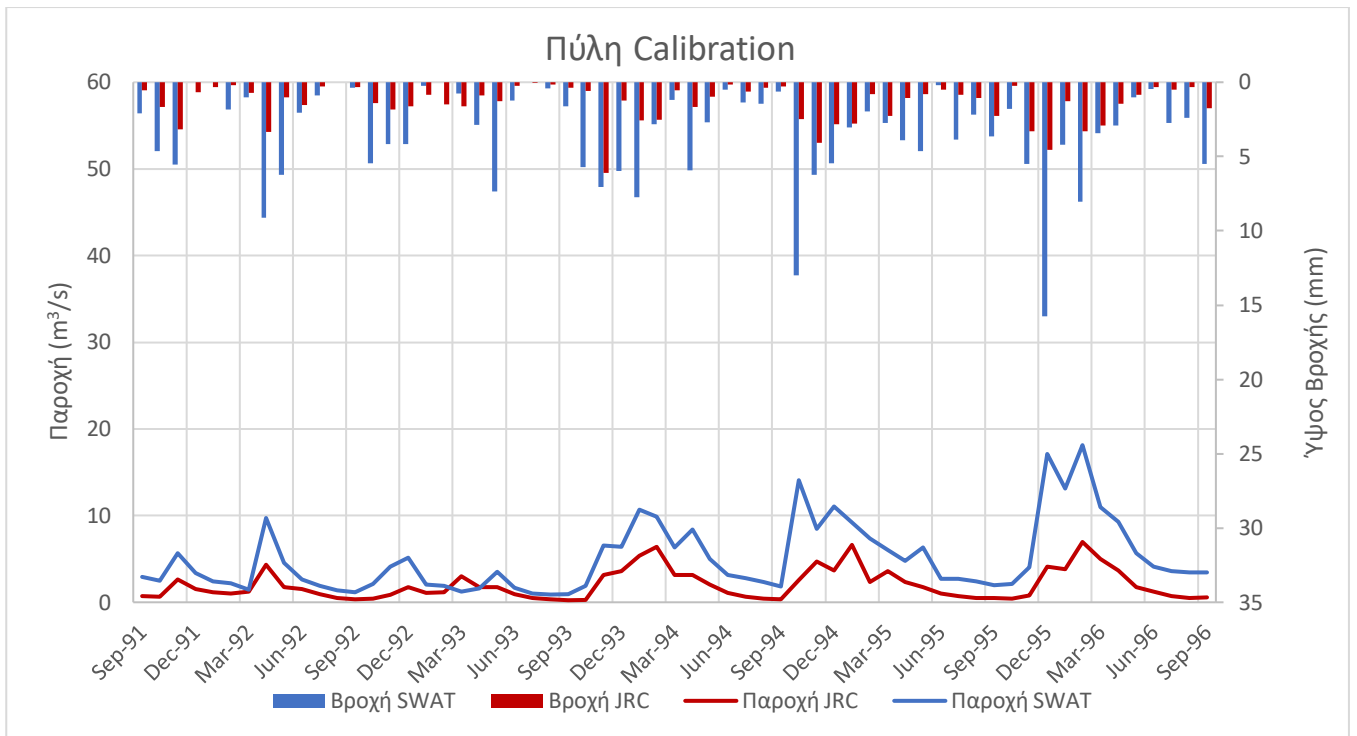
Η βροχή που προσομοιώνεται στο μοντέλο LISFLOOD, λαμβάνεται από την βάση δεδομένων MARS. Τα δεδομένα βρίσκονται σε μορφή κανάβου διάστασης 25×25 km όπου το κάθε εικονοστοιχείο περιέχει και μία χρονοσειρά βροχής με ημερήσιο βήμα υπολογισμού. Για την ένταξη της βροχής στο διάγραμμα, επιλέγονται 4 εικονοστοιχεία που καλύπτουν σχεδόν εξ' ολοκλήρου την περιοχή μελέτης και θεωρούνται αντιπροσωπευτικά για την λήψη των ζητούμενων χρονοσειρών. Τα δεδομένα ανάγονται σε τιμές μέσης ημερήσιας βροχής για κάθε μήνα όπως συμβαίνει και με τα πραγματικά δεδομένα των σταθμών. Τα εικονοστοιχεία αυτά δίνονται στον Χάρτη 15. Πιο συγκεκριμένα, στο διάγραμμα της Καλαμπάκας διακρίνεται η βροχόπτωση που προκύπτει από την μέση τιμή κάθε βήματος των χρονοσειρών των εικονοστοιχείων 1 και 3, στο διάγραμμα της Πύλης φαίνεται η βροχόπτωση του εικονοστοιχείου 2 και στην έξοδο ο μέσος όρος και των τεσσάρων χρονοσειρών. Στις περιπτώσεις της Καλαμπάκας και των Τρικάλων θεωρείται ασφαλής επιλογή, ο υπολογισμός του μέσου όρου για την παρουσίαση της βροχής στο διάγραμμα, καθώς κατά την επεξεργασία των χρονοσειρών παρατηρήθηκαν ιδιαίτερα μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των τιμών μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί αρχικά από την μικρή ακρίβεια του κανάβου, αλλά και από τον μικρό αριθμό πραγματικών σταθμών της περιοχής που λαμβάνονται υπόψιν στην παραγωγή του χάρτη.



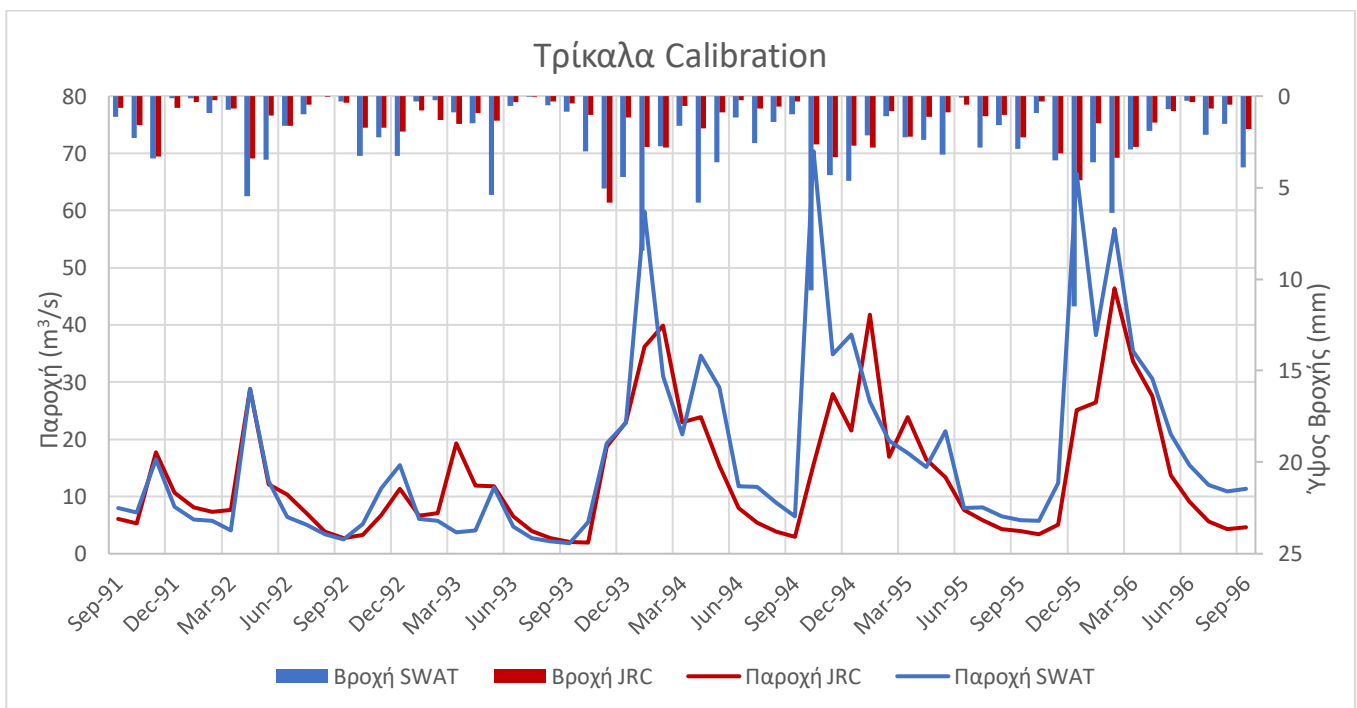
Χάρτης 15: Εικονοστοιχεία βάσης δεδομένων MARS (πηγή: <https://ec.europa.eu/jrc/en>)



Εικόνα 29: Διάγραμμα χρονοσειρών παροχής στην περιοχή της Καλαμπάκας για την περίοδο της βαθμονόμησης



Εικόνα 30: Διάγραμμα χρονοσειρών παροχής στην περιοχή της Πύλης για την περίοδο της βαθμονόμησης



Εικόνα 31: Διάγραμμα χρονοσειρών παροχής στην έξοδο της λεκάνης (περιοχή Τρικάλων) για την περίοδο της βαθμονόμησης

Με βάση τις παροχές των παραπάνω διαγραμμάτων υπολογίζονται οι στατιστικές παράμετροι με τις οποίες γίνεται ο έλεγχος της βαθμονόμησης. Παρατηρείται ότι κατά κανόνα οι έλεγχοι δεν ικανοποιούνται σύμφωνα με τα όρια που τίθενται από την βιβλιογραφία (Πίνακας 30).

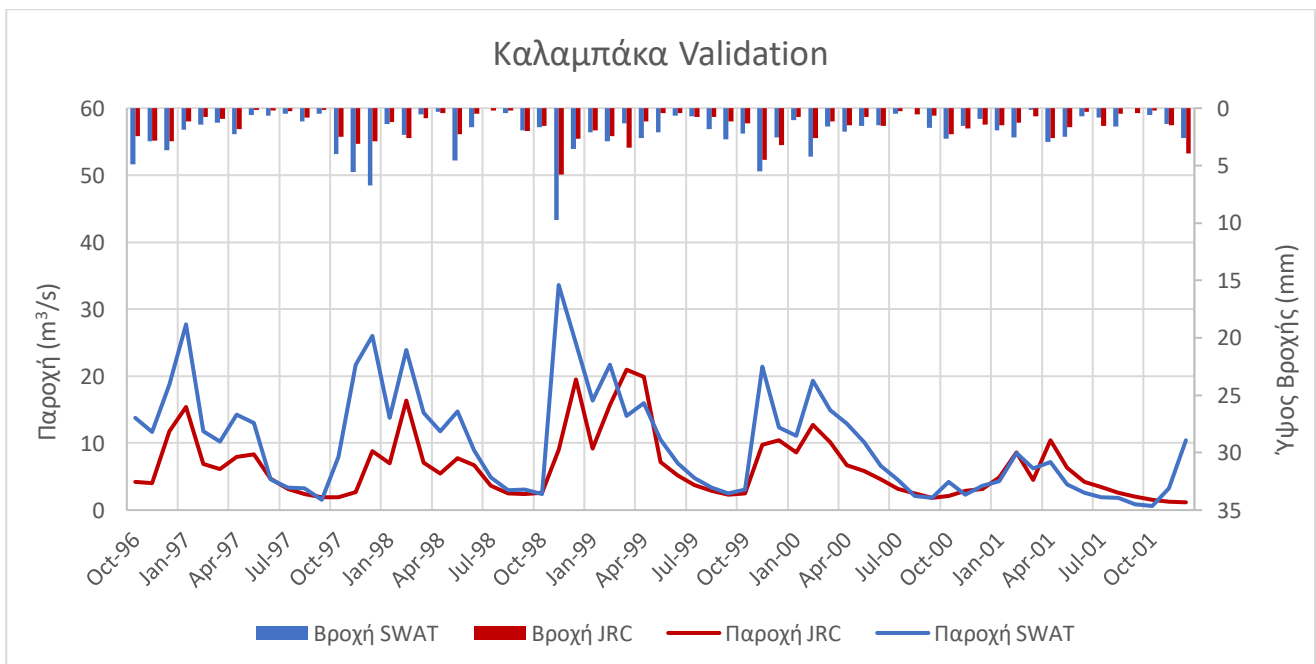
Πίνακας 30: Τιμές στατιστικών μεγεθών στις τρεις θέσεις ελέγχου για την περίοδο της βαθμονόμησης

Έλεγχος	Καλαμπάκα	Πύλη	Τρίκαλα
NSE	-0.8	-4.6	0
R ²	0.37	0.69	0.57
PBIAS	-9%	-151%	-26%

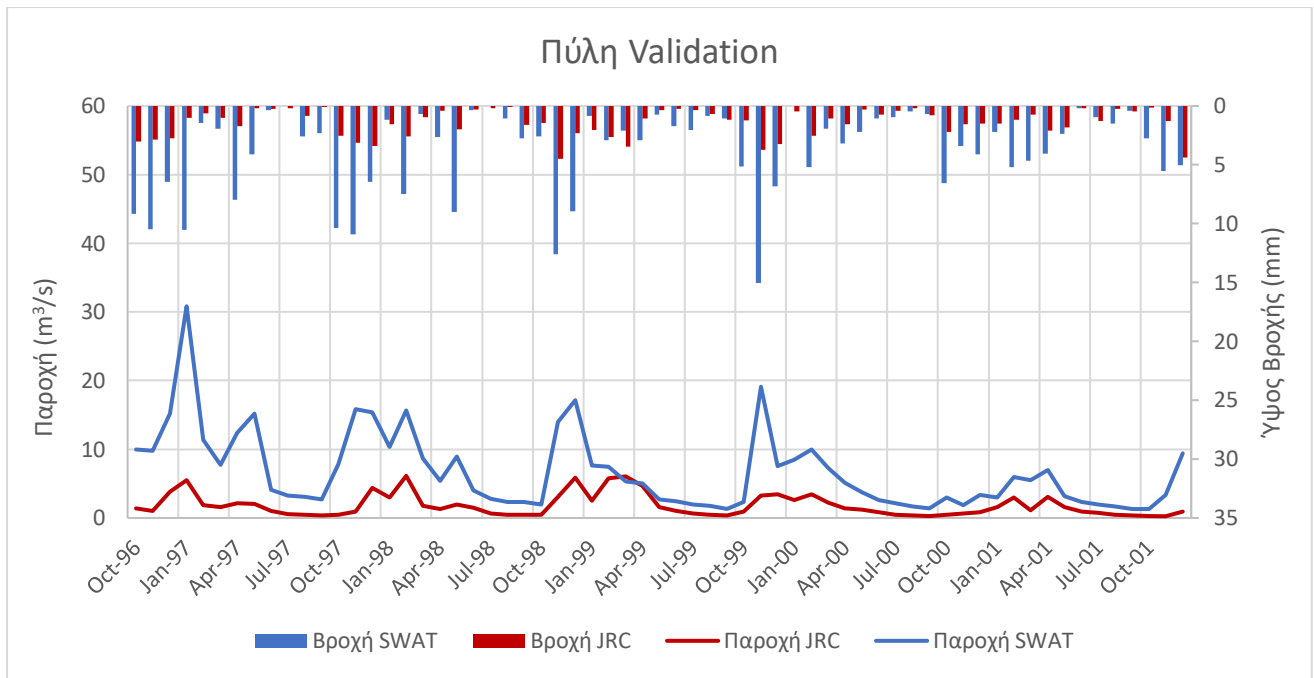
Από τα παραπάνω αποτελέσματα δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα καθώς πρόκειται για σύγκριση δύο μοντέλων που διαφέρουν σημαντικά στα δεδομένα βροχής τα οποία προσομοιώνουν. Στα διαγράμματα φαίνεται αυτή η διαφορά καθώς κατά κανόνα οι τιμές τα δεδομένα βροχής του μοντέλου SWAT είναι μεγαλύτερες από αυτές του JRC, έτσι οι παροχές αντίστοιχα παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές.

4.2 Επαλήθευση μοντέλου

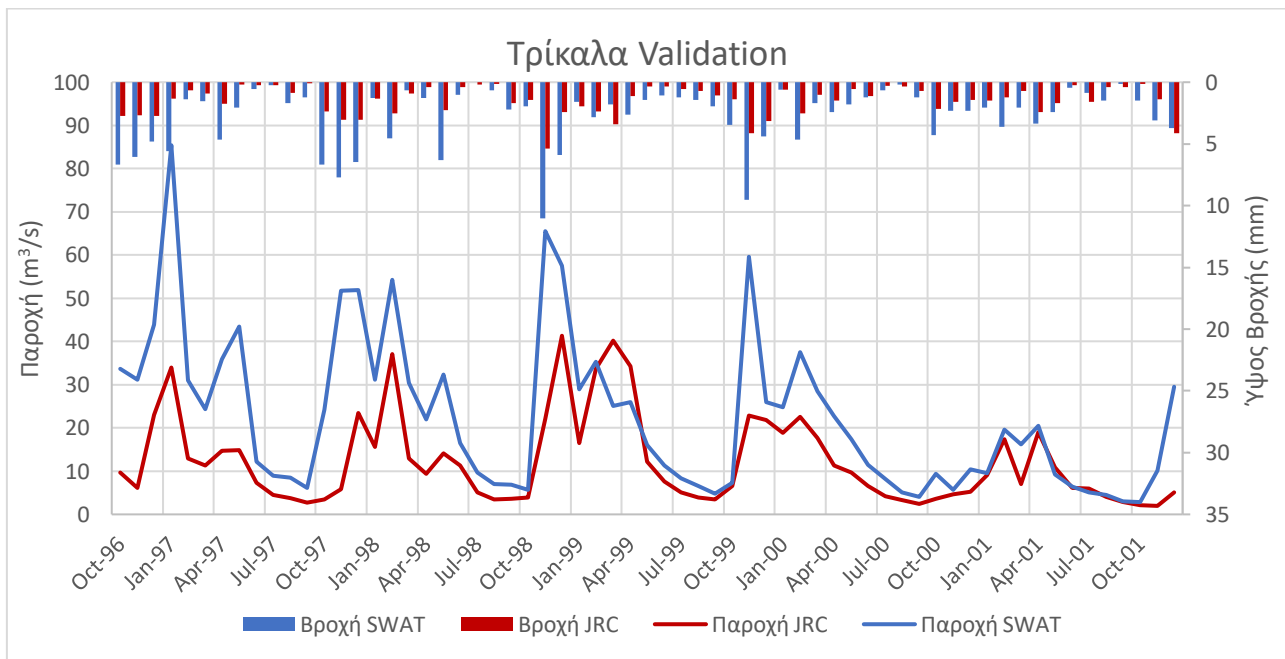
Για την διαδικασία επαλήθευσης συγκρίνονται οι χρονοσειρές για την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1996 μέχρι και τον Δεκέμβριο του 2001. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ομοίως με αυτά της βαθμονόμησης λαμβάνοντας τις αντίστοιχες χρονοσειρές παροχών και βροχής για τα δύο μοντέλα από τους ίδιους σταθμούς που αναλύθηκαν παραπάνω. Στις Εικόνες 32-34 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Γίνονται εκ νέου οι στατιστικοί έλεγχοι τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στον πίνακα 31.



Εικόνα 32: Διάγραμμα χρονοσειρών παροχής στην περιοχή της Καλαμπάκας για την περίοδο της επαλήθευσης



Εικόνα 33: Διάγραμμα χρονοσειρών παροχής στην περιοχή της Πύλης για την περίοδο της επαλήθευσης



Εικόνα 34: Διάγραμμα χρονοσειρών παροχής στην περιοχή των Τρικάλων για την περίοδο της επαλήθευσης

Πίνακας 31: Τιμές στατιστικών μεγεθών στις θέσεις ελέγχου για την περίοδο της επαλήθευσης

Έλεγχος	Καλαμπάκα	Πύλη	Τρίκαλα
NSE	-0.83	-16.5	-1.5
R ²	0.52	0.45	0.54
PBIAS	-55%	-269%	-83%

Για την περίοδο της επαλήθευσης τα αποτελέσματα των παροχών φαίνονται να αποκλίνουν περισσότερο από αυτά της βαθμονόμησης ειδικά στα υγρά έτη.

Γενικά λαμβάνοντας υπόψιν την συνολική χρονοσειρά των παροχών (βαθμονόμησης και επαλήθευσης), παρατηρούμε αρχικά την αδυναμία αξιόπιστης βαθμονόμησης του μοντέλου SWAT με την χρήση των τιμών του JRC. Επιπλέον κοιτώντας τα διαγράμματα και ειδικά την βροχόπτωση που εισέρχεται στα δύο μοντέλα φαίνεται μία αδυναμία της βάσης των μετεωρολογικών δεδομένων του MARS να παράξει κοντινές χρονοσειρές βροχής με τις πραγματικές. Οι διακυμάνσεις της βροχής, και συνεπώς και της απορροής, χωρικά και χρονικά είναι πολύ μικρότερες από αυτές που υποδηλώνουν οι μετρήσεις των σταθμών που εισέρχονται στο πρόγραμμα του SWAT. Το γεγονός αυτό επηρεάζεται από δύο κύριους παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας αφορά τον αριθμό των σταθμών που λαμβάνει υπόψιν η βάση MARS, ο οποίος είναι ιδιαίτερα μικρός σύμφωνα και με τον χάρτη των σταθμών που χρησιμοποιεί, σε συνδυασμό με την χωρική παρεμβολή που πραγματοποιεί. Αυτό οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα στις τιμές των μετεωρολογικών δεδομένων. Ο δεύτερος παράγοντας που δεν επιτρέπει τις μεγάλες διακυμάνσεις χωρικά είναι η ακρίβεια του κανάβου, η οποία είναι πολύ μικρή για να περιγράψει τον βροχή εντός μίας λεκάνης της προκειμένης έκτασης. Τέλος όσον αφορά τις χρονοσειρές των παροχών, λόγω της επίσης μικρής ακρίβειας του σχετικού κανάβου είναι αδύνατη η ακριβής εκτίμηση της ροής εντός των υδατορεμάτων οι διαστάσεις των οποίων είναι κατά πολύ μικρότερες.

4.3 Σύγκριση απορροών

Δεδομένου ότι, όπως φαίνεται και στην σύγκριση των μοντέλων, υπάρχει μία σημαντική διαφορά μεταξύ των παροχών των δύο μοντέλων γίνεται μία ακόμα σύγκριση με τα δεδομένα των μέσων ετήσιων απορροών για 4 υπολεκάνες τις περιοχής, τα οποία είναι τα μόνα δεδομένα πεδίου που βρέθηκαν δημοσιευμένα. Με αυτά συγκρίνονται και τα δύο μοντέλα ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για το κατά πόσο τα αποτελέσματα περιγράφουν την πραγματικότητα σε επίπεδο μέσων ετήσιων απορροών. Οι παράμετροι που υπολογίζονται και συμμετέχουν στην σύγκριση αυτή είναι ο συντελεστής απορροής (C) και η μονάδα ειδικής απορροής (E). Ο συντελεστής απορροής ορίζεται ως το κλάσμα του όγκου του νερού που απορρέει στην έξοδο μίας λεκάνης (V) σε μία χρονική περίοδο, προς το συνολικό διαθέσιμο νερό εντός της λεκάνης που προέρχεται από την κατακρήμνιση (P) για την ίδια περίοδο. Η μονάδα ειδικής απορροής ορίζεται ως ο όγκος απορροής διαιρεμένος με την έκταση της λεκάνης (A), δηλαδή ο όγκος ανά μονάδα επιφάνειας. Έτσι, για κάθε υπολεκάνη υπολογίζονται οι παραπάνω τιμές και για τα δύο μοντέλα. Αρχικά παρατίθενται οι μετρημένες τιμές των απορροών καθώς και τα μεγέθη με τα οποία θα γίνει η αξιολόγηση (Πίνακας 32).

Πίνακας 32: Μέσα ετήσια υδρολογικά μεγέθη κυριότερων υπολεκανών (πηγή: Κουτσογιάννης κ.α., 2008)

Θέση	A (km ²)	P (hm ³)	V (hm ³)	C	E (hm ³ /km ²)
Πύλη	137.2	229.5	129.3	0.56	0.94
Μουζάκι	143.3	193.6	97.8	0.50	0.68
Γάβρος	227.9	172.3	37.8	0.22	0.17
Σαρακίνα	1,068.9	1,226.1	271.2	0.22	0.22

Εν συνεχεία, υπολογίζονται τα αντίστοιχα μεγέθη που προκύπτουν από την τελική προσομοίωση. Για την εκτίμηση της μέσης ετήσιας απορροής, επιλέγονται οι χρονοσειρές στην έξοδο ή είσοδο των υπολεκανών ώστε να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη θέση των μετρήσεων. Αντιστοίχως, επιλέγονται και τα εικονοστοιχεία του κανάβου του μοντέλου LISFLOOD. Και στις δύο περιπτώσεις τελικά υπολογίζονται τα ίδια υδρολογικά μεγέθη. Σημειώνεται ότι για λόγους πληρότητας οι υδρολογικές παράμετροι υπολογίζονται και στην έξοδο για το σύνολο της λεκάνης.

Για την εργασία αυτή χρειάζονται οι εκτάσεις των λεκανών ανάντη των επιλεγμένων σημείων εξόδου καθώς και μία εκτίμηση του ύψους βροχής εντός της λεκάνης. Για το μοντέλο SWAT οι εκτάσεις προκύπτουν εύκολα από την ανάλυση σε περιβάλλον GIS για κάθε υπολεκάνη. Το ύψος βροχής εντός των λεκανών προέρχεται από τον πίνακα αποτελεσμάτων του μοντέλου SWAT όπως έχει αναφερθεί και στο υποκεφάλαιο 4.1. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας για το μοντέλο SWAT πινακοποιούνται παρακάτω (Πίνακας 33)

Πίνακας 33: Μέσα ετήσια υδρολογικά μεγέθη κυριότερων υπολεκανών του μοντέλου SWAT

Θέση	A	P	V	C	E
	(km ²)	(hm ³)	(hm ³)		(hm ³ /km ²)
Πύλη	150.2	202.7	91.5	0.45	0.61
Μουζάκι	248.3	335.0	150.7	0.45	0.61
Γάβρος	312.6	216.8	48.0	0.23	0.15
Σαρακίνα	1114	753.5	272.2	0.36	0.24
Τρίκαλα	1756.1	1723.7	621.1	0.36	0.35

Για την εκτίμηση των υδρολογικών παραμέτρων του μοντέλου LISFLOOD αρχικά επιλέγεται το εικονοστοιχείο στο οποίο θα υπολογιστούν μέσες ετήσιες απορροές. Τα εικονοστοιχεία επιλέγονται ώστε να βρίσκονται όσο το δυνατόν πιο κοντά στις περιοχές των μετρήσεων πεδίου των απορροών. Αφού καθοριστούν τα σημεία αυτά σειρά έχει η εκτίμηση της έκτασης της ανάντη λεκάνης απορροής. Αρχικά, εντοπίζονται όλα τα ανάντη εικονοστοιχεία που απορρέουν στο ζητούμενο σημείο και αθροίζονται ώστε να προκύψει κατά προσέγγιση η ζητούμενη έκταση. Υπενθυμίζεται ότι το κάθε εικονοστοιχείο έχει εμβαδόν ίσο με 25 km² συνεπώς σε κάθε περίπτωση η έκταση προκύπτει πολλαπλάσιο αυτού. Η ποσότητα της βροχής λαμβάνεται από τα πιο αντιπροσωπευτικά εικονοστοιχεία του κανάβου MARS (βλ. υποκεφάλαιο 4.1) και τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 34.

Πίνακας 34: Μέσα ετήσια υδρολογικά μεγέθη κυριότερων υπολεκανών του μοντέλου LISFLOOD

Θέση	A	P	V	C	E
	(km ²)	(hm ³)	(hm ³)		(hm ³ /km ²)
Πύλη	150	71.6	34.1	0.44	0.23
Μουζάκι	200	74.7	43.8	0.42	0.22

Γάβρος	225	118.5	51.3	0.44	0.23
Σαρακίνα	1050	569.7	239	0.43	0.23
Τρίκαλα	1750	936.0	442.5	0.47	0.25

Η περίοδος από την οποία προκύπτουν τα μέσα ετήσια υδρολογικά μεγέθη των μοντέλων περιορίζονται από την διαθέσιμη χρονοσειρά της προσομοίωσης ωστόσο αναμένεται παρόμοια μορφή απόκρισης σε γειτονικές λεκάνες. Υπάρχουν δηλαδή κριτήρια τα οποία μπορούν σε αυτές τις συνθήκες να βοηθήσουν στην εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων για την αξιοπιστία προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου SWAT δείχνουν αυτή τη χωρική συσχέτιση όσον αφορά κυρίως τον συντελεστή απορροής. Σε γειτονικές λεκάνες όπως αυτές της Πύλης και του Μουζακίου οι συντελεστές απορροής και η μονάδα ειδικής απορροής σχεδόν ταυτίζονται. Επίσης οι υδρολογικές παράμετροι της λεκάνης της Σαρακίνας που αποτελεί ένα μεγάλο κομμάτι της έκτασης της συνολικής λεκάνης των Τρικάλων (πάνω από την μισή έκτασης της περιοχής) είναι πολύ κοντινές σε σχέση με αυτές που προκύπτουν για το σύνολο της περιοχής. Επίσης οι τιμές των υδρολογικών μεγεθών προσεγγίζουν αρκετά καλά τις μετρημένες τιμές. Αντίθετα, οι παράμετροι του μοντέλου LISFLOOD παρουσιάζουν ανεπαίσθητες διαφορές μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό μπορεί και πάλι να αποδοθεί στην έλλειψη της απαραίτητης ακρίβειας των μετεωρολογικών δεδομένων και του κανάβου των αποτελεσμάτων.

5. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

Το βασικό ερώτημα που καλείται να απαντήσει η παρούσα μελέτη αφορά την δυνατότητα εκτίμησης των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην επιλεγμένη περιοχή μελέτης (υπολεκάνη του Πηνειού) από τα μοντέλα SWAT και JRC-LISFLOOD. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αρχικά μία αναφορά στις προκλήσεις κατά την φάση της μοντελοποίησης και στα προβλήματα που μπορούν να ανακύψουν στην προσπάθεια αυτή. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία συζήτηση των τελικών αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων που προκύπτουν από αυτά. Τέλος, γίνεται μία αναφορά στις μελλοντικές προκλήσεις του κλάδου και σε ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

5.1 Γενικά συμπεράσματα μοντελοποίησης

Πρώτο βήμα, μίας οποιασδήποτε προσπάθειας μοντελοποίησης φυσικών φαινομένων, αποτελεί η συλλογή πρωτογενών δεδομένων της περιοχής μελέτης. Στην παρούσα εργασία σημαντικό εμπόδιο κατέστη η εύρεση δεδομένων βροχής και θερμοκρασίας με χρονοσειρές μετρήσεων ικανοποιητικής ακρίβειας και μεγέθους. Ενώ βρέθηκε και επεξεργάστηκε ένας μεγάλος αριθμός μετεωρολογικών σταθμών του ελληνικού δικτύου, τελικά πολλοί εξ αυτών παρουσίασαν προβλήματα όπως κενά μετρήσεων ή μικρές σε μήκος χρονοσειρές. Πέρα από την έλλειψη αξιόπιστων σταθμών, κύριο πρόβλημα αποτελεί και η διάθεση των δεδομένων στο κοινό. Η διαδικασία απόκτησης των δεδομένων είναι δύσκολη και σε ορισμένες περιπτώσεις αδύνατη καθώς πολλά από αυτά δεν βρίσκονται ελεύθερα στο διαδίκτυο ή δεν είναι σε επεξεργάσιμη μορφή. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι ελλείψεις στις χρονοσειρές των δεδομένων προξένησαν ένα επιπλέον πρόβλημα όσον αφορά το μέγεθος της τελικής χρονοσειράς εισόδου στο μοντέλο SWAT, η οποία περιορίστηκε σημαντικά. Τελικά, τα δεδομένα που ελήφθησαν από σταθμούς του δικτύου της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και του Υπουργείου Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής θεωρήθηκαν αρκετά για την μοντελοποίηση στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, αναφορικά με τα γεωχωρικά δεδομένα που βρέθηκαν σε ευρωπαϊκές και παγκόσμιες βάσεις δεδομένων, η απόκτηση τους ήταν ευκολότερη καθώς οι χάρτες του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, της κάλυψης γης και του τύπου εδάφους διατίθενται ελεύθεροι στο διαδίκτυο με αποδεκτή ακρίβεια και σε μορφή επεξεργάσιμη από προγράμματα GIS που είναι και το ζητούμενο.

Δεύτερο σημαντικό στοιχείο είναι η βαθμονόμηση του μοντέλου με βάση πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Στο ελληνικό δίκτυο της περιοχής δεν βρέθηκαν υδρομετρικοί σταθμοί με διαθέσιμες χρονοσειρές παροχών. Το γεγονός αυτό δυσκόλεψε σημαντικά την διαδικασία της βαθμονόμησης. Σε μία προσπάθεια επαλήθευσης του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τελικά τα αποτελέσματα του μοντέλου του JRC που είναι προσομοιωμένα στο πρόγραμμα LISFLOOD. Οι χρονοσειρές που αντλήθηκαν σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τις μετρήσεις πεδίου. Η βαθμονόμηση ωστόσο πραγματοποιήθηκε κανονικά και τελικά στο πλαίσιο της εργασίας έγινε μία συγκριτική ανάλυση των δύο μοντέλων με βάση τα βασικά υδρολογικά χαρακτηριστικά τους και πιο συγκεκριμένα με τον συντελεστή απορροής και την μονάδα ειδικής απορροής. Στην σύγκριση αυτή συμμετείχαν και δημοσιευμένα στοιχεία εκτιμήσεων των πραγματικών υδρολογικών μεγεθών σε 4 θέσεις εντός της λεκάνης.

Στη συνέχεια γίνεται μία συζήτηση των συμπερασμάτων που προκύπτουν με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης που έχει περιγραφεί.

5.2 Συμπεράσματα μοντέλων

Αρχικά αξίζει να σημειωθεί ότι τα κατανεμημένα μοντέλα όπως το SWAT περιέχουν ένα μεγάλο εύρος παραμέτρων για την ανάλυση των υδρολογικών συνθηκών σε μία λεκάνη και έτσι παρουσιάζονται συχνά προβλήματα υπερμετροποίησης. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου η επεξεργασία τους

πραγματοποιείται χειροκίνητα, όπως στην παρούσα εργασία, καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολος ο προσδιορισμός των ευαίσθητων παραμέτρων για τον ακριβή καθορισμό των ορίων τους, ώστε η προσομοίωση να περιγράφει σωστά την πραγματικότητα. Για τον λόγο αυτό γίνεται μία βιβλιογραφική διερεύνηση όσον αφορά τα προτεινόμενα όρια των παραμέτρων και εφαρμόζονται αναλόγως τα βέλτιστα εύρη για τον κάθε συντελεστή μετά από πλήθος προσομοιώσεων.

Η διαδικασία αυτή γίνεται ακόμα δυσκολότερη στην περίπτωση που η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με την χρήση αποτελεσμάτων άλλου μοντέλου. Το κάθε μοντέλο χρησιμοποιεί διαφορετικά δεδομένα εισόδου και τα εφαρμόζει στις εσωτερικές του διεργασίες με διαφορετικό τρόπο. Κάθε μοντέλο έχει τα θετικά και τα αρνητικά του χαρακτηριστικά καθώς ο σκοπός για τον οποίον έχουν αναπτυχθεί μπορεί να διαφέρει εν μέρει. Το μοντέλο SWAT έχει αναπτυχθεί για την προσομοίωση λεκανών απορροής για μεγάλα χρονικά διαστήματα και όχι για την εκτίμηση ταχέων πλημμυρικών φαινομένων (flash floods). Έτσι η εφαρμογή του δεν μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά σε μικρές λεκάνες απορροής με μικρούς χρόνους συγκέντρωσης. Η συνολική έκταση της λεκάνης θεωρείται ικανοποιητική, όμως οι υπολεκάνες που αναλύονται κατά τον έλεγχο του μοντέλου λόγω της σημαντικά μικρότερης έκτασης τους μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα σφαλμάτων. Προς την ίδια κατεύθυνση στοχεύει και το μοντέλο του JRC το οποίο κατασκευάστηκε για την προσομοίωση ακόμα μεγαλύτερων διακρατικών λεκανών της Ευρώπης και έχει βαθμονομηθεί με βάση αυτές. Αυτό μαρτυράται από τις διαστάσεις του κανάβου των δεδομένων βροχής και των αποτελεσμάτων απορροής. Η κύρια χρήση του είναι η παροχή πληροφορίας επιφανειακής απορροής για όλη την Ευρώπη. Η μικρή ακρίβεια δικαιολογείται από το γεγονός ότι η βάση δεδομένων ανανεώνεται συνεχώς. Για να επιτευχθεί καλύτερη χωρική ακρίβεια στο μοντέλο για μία τέτοια έκταση, απαιτείται αρχικά περισσότερη και πιο λεπτομερής πληροφορία η οποία μπορεί να μην είναι διαθέσιμη σε όλη την έκταση της. Επιπλέον, σε μία τέτοια περίπτωση ο υπολογιστικός φόρτος θα ήταν τεράστιος και η ικανότητα συνεχούς ανανέωσης των αποτελεσμάτων σχεδόν αδύνατη. Έτσι η βάση δεδομένων παρέχει αρχικά βασικές υδρολογικές πληροφορίες, σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει άλλη πηγή, και χρονοσειρές βροχής και απορροής μεγάλου μεγέθους για την στατιστική αξιοποίηση τους.

Η διαφορά στα δεδομένα των βροχών των δύο μοντέλων είναι ένα σημαντικό στοιχείο που δεν καθιστά δυνατή την σωστή βαθμονόμηση του SWAT. Το μοντέλο JRC δεν έχει την δυνατότητα καλής χωρικής μεταβολής της βροχής στην λεκάνη σε αντίθεση με το SWAT που αυτό επιτυγχάνεται ορθότερα με την επιλογή πραγματικών μετρήσεων πεδίου σε όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία κοντά και εντός της περιοχής μελέτης. Ο μικρός αριθμός σταθμών για τους οποίους βρέθηκαν δεδομένα δεν είναι ιδανικός, αλλά σε κάθε περίπτωση περιγράφει καλύτερα την πραγματικότητα. Η διαφορά αυτή οδηγεί τα αποτελέσματα των μοντέλων να παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Ενώ τα μοντέλα συμφωνούν στην εποχικότητα και την περιοδικότητα, δηλαδή στις χρονικές περιόδους που εντοπίζονται τα τοπικά ακρότατα και τα υγρά ή ξηρά έτη, χάνουν σημαντικά στην τάξη μεγέθους. Το SWAT λόγω του σημειακού χαρακτήρα των αποτελεσμάτων που παρέχει (σημειακές βροχές και παροχές εντός του υδατορέματος) υπερεκτιμά συστηματικά τις απορροές ενώ αντίστοιχα η χωρική κατανομή που χρησιμοποιεί το JRC έχει τα αντίστροφα αποτελέσματα. Έτσι, δεν αποτελεί παράδοξο το γεγονός ότι οι στατιστικοί έλεγχοι, κατά κανόνα, δεν μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτοί. Εξάλλου τα όρια που τίθενται αφορούν την κλασική μέθοδο βαθμονόμησης, με την χρήση δηλαδή μετρήσεων πεδίου.

Για την εκτίμηση της απόκλισης των δύο μοντέλων καταρτίζονται διαγράμματα που υποδεικνύουν τις ποσοστιαίες διαφορές των βροχών και των απορροών ανά μήνα καθώς και η μέση τιμή αυτών στις τρεις θέσεις ελέγχου (Εικόνες 35-40).



Εικόνα 35: Ποσοστιαία διαφορά βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής της Καλαμπάκας



Εικόνα 36: Ποσοστιαία διαφορά παροχών στο θέση της Καλαμπάκας



Εικόνα 37: Ποσοστιαία διαφορά βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής της Πύλης



Εικόνα 38: Ποσοστιαία διαφορά παροχών στην θέση της Πύλης



Εικόνα 39: Ποσοστιαία διαφορά βροχόπτωσης στην συνολική έκταση της λεκάνης απορροής



Εικόνα 40: Ποσοστιαία διαφορά παροχών στο σημείο εξόδου της λεκάνης

Από τις εικόνες φαίνονται οι σημαντικές διαφορές στα δεδομένα βροχής που φτάνουν σε ποσοστά της τάξης του 50% κατά μέσο όρο για την λεκάνη της Καλαμπάκας, 250% στην λεκάνη της Πύλης και 117% για την συνολική λεκάνη. Σημαντικό είναι ωστόσο ότι αυτές οι διαφορές αντικατοπτρίζονται και στις αντίστοιχες παροχές όπου η μέση ποσοστιαία διαφορά να φτάνουν το 41% στην Καλαμπάκα, το 292% στην Πύλη και το 73% στα Τρίκαλα.

Τα τελικά συμπεράσματα ολοκληρώνονται μετά από μία την ανάλυση των υδρολογικών παραμέτρων που προκύπτουν από τα δύο μοντέλα. Το θετικό ειδικά του συντελεστή απορροής έγκειται στο γεγονός ότι δεν εξαρτάται από την απόλυτη ποσότητα βροχής και απορροής αλλά από την σχέση μεταξύ τους. Στους Πίνακες 35, 36 συνοψίζονται τα υδρολογικά χαρακτηριστικά των λεκανών για τα δυο μοντέλα και παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά τους με τις πραγματικές τιμές που παρουσιάζονται στο Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων (Κουτσογιάννης κ.α., 2008). Παρατηρείται τελικώς, μία καλύτερη συμπεριφορά του μοντέλου SWAT σε σχέση με το JRC με βάση τους συντελεστές απορροής και την ειδική απορροή. Το JRC και εδώ δεν μπορεί να περιγράψει τις διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε υπολεκάνη και ειδικά στις μικρότερες εξ αυτών που είναι αυτές της Πύλης και του Μουζακίου. Αντιθέτως, το SWAT ακολουθεί την τάση που υποδεικνύεται από τις γνωστές τιμές. Οι αποκλίσεις του μοντέλου JRC φτάνουν έως και το 100% για τους συντελεστές απορροής σε αντίθεσή με την μέγιστη απόκλιση του SWAT που είναι ίση με 64%. Όσον αφορά τις μονάδες ειδικής απορροής η απόκλιση του SWAT φτάνει το 35% ενώ αυτή του JRC το 76% κατ' απόλυτη τιμή.

Πίνακας 35: Σύγκριση συντελεστών απορροής

Θέση	Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης	SWAT		LISFLOOD	
	C	C	Ποσοστιαία Διαφορά	C	Ποσοστιαία Διαφορά
Πύλη	0.56	0.45	-20%	0.44	-21%
Μουζάκι	0.50	0.45	-10%	0.42	-16%
Γάβρος	0.22	0.23	5%	0.44	100%
Σαρακίνα	0.22	0.36	64%	0.43	95%

Πίνακας 36: Σύγκριση ειδικής απορροής

Θέση	Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης	SWAT		LISFLOOD	
	E	E	Ποσοστιαία Διαφορά	E	Ποσοστιαία Διαφορά
	(hm^3/km^2)	(hm^3/km^2)		(hm^3/km^2)	
Πύλη	0.94	0.61	-35%	0.23	-76%
Μουζάκι	0.68	0.61	-10%	0.22	-68%
Γάβρος	0.17	0.15	-12%	0.23	35%
Σαρακίνα	0.22	0.24	9%	0.23	5%

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Το μέλλον για την επιστήμη της υδρολογίας βασίζεται στις υδρολογικές προσομοιώσεις και στα αντίστοιχα προγράμματα που συνεχώς αναπτύσσονται και βελτιώνονται. Οι βάσεις πρωτογενών δεδομένων ανανεώνονται και εμπλουτίζονται συνεχώς και μπορούν να συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στην προσπάθεια αυτή.

Προτείνεται λοιπόν αρχικά η ανάπτυξη του δικτύου σταθμών για την παροχή αξιόπιστων μετρήσεων πεδίου ώστε η διαδικασία της προσομοίωσης να διευκολυνθεί και να γίνει όσο το δυνατόν πιο ακριβής σε σχέση με την πραγματικότητα. Επιπλέον, σημαντικό είναι να αναπτυχθούν στο μέλλον μοντέλα προσομοίωσης τόσο για τις κυριότερες λεκάνες απορροής της Ελλάδας όσο και για τις πλημμυρικά ευάλωτες περιοχές. Αυτό μπορεί να συμβάλει τα μέγιστα στην αντιμετώπιση των πλημμυρικών φαινομένων αλλά και στη διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων της κάθε περιοχής. Τέλος, η έρευνα στον ελλαδικό χώρο μπορεί να εμπλουτιστεί ακόμα περισσότερο με συγκρίσεις των μοντέλων SWAT και LISFLOOD σε άλλες λεκάνες απορροής ώστε να καθοριστούν με μεγαλύτερη αξιοπιστία οι αποκλίσεις των δύο υδρολογικών προγραμμάτων.

6. Βιβλιογραφία

Αγγλική

T. Andrea, 2014. *Gridded Agro-Meteorological Data in Europe*. European Commission, Joint Research Centre (JRC).

J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, S. L. Neitsch, 2012. *Input/Output Documentation Version 2012*. Texas Water Resources Institute.

J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. Harmel, A. van Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan, M. K. Jha, 2012. *Swat: Model Use, Calibration, And Validation*. Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers, ISSN 2151-0032, Vol. 55(4): 1491-1508.

ASABE, 2017. *Guidelines for Calibrating, Validating and Evaluating Hydrologic and Water Quality (H/WQ) Models*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan.

G. D. Bathrellos, H. D. Skilodimou, K. Soukis, E. Koskeridou, 2018. *Temporal and Spatial Analysis of Flood Occurrences in the Drainage Basin of Pinios River (Thessaly, Central Greece)*. National and Kapodistrian University of Athens, Athens, Greece.

P. Burek, J. van der Kniff, A. de Roo, 2013. *LISFLOOD Distributed Water Balance and Flood Simulation Model, Revised User Manual*. Joint Center Institute for Environment and Sustainability.

Centre for Applied Climate Sciences, Institute for Life Sciences and the Environment, University of Southern Queensland, Centre for Sustainable Agricultural Systems, Institute for Life Sciences and the Environment, University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia.

A. El-Sadek, A. Irvem, 2014. *Evaluating the impact of land use uncertainty on the simulated streamflow and sediment yield of the Seyhan River basin using the SWAT model*. Desert Research Center, Ecology and Dryland Agriculture Division, Cairo, Egypt, Biosystem Engineering Department, Faculty of Agriculture, Mustafa Kemal University, Antakya, Turkey Vol. 38: 515-530.

European Environment Agency, 2016. *Climate change impacts and vulnerability in Europe 2016, An indicator-based report*. European Union, ISSN 1977-8449, Copenhagen, Denmark.

L. Feyen, 2005. *Calibration of the LISFLOOD Model for Europe: Current Status and Way Forward*. Joint Center Institute for Environment and Sustainability.

P. W. Gassman, M. R. Reyes, C. H. Green, J. G. Arnold, 2007. *The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions*. Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers, ISSN 0001-2351, Vol. 50(4): 1211-1250.

K. D. Gayathri, B. P. Ganasri, G. S. Dwarakish, 2015. *A Review on Hydrological Models*. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering, Aquatic Procedia Vol. 4: 1001 – 1007.

P. Gilewski, A. Weglarz, 2018. *Impact of Land-Cover Change Related to Urbanization on Surface Runoff Estimation*. MATEC Web of Conferences.

- Y. Her, J. Frankenberger, I. Chaubey, R. Srinivasan, 2015. *Threshold Effects in HRU Definition Of The Soil And Water Assessment Tool. Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers, ISSN 2151-0032, Vol. 58(2): 367-378.*
- A. Mahleras, A. Kontogianni, M. Skourtos, 2007. *Pinios River Basin – Greece, Status Report. AquaMoney, Development and Testing of Practical Guidelines for the Assessment of Environmental and Resource Costs and Benefits in the WFD.*
- C. Mazzetti, D. Decremer, C. Barnard, M. Blick, C. Carton de Wiart, F. Wetterhall, C. Prudhomme, 2020. *River discharge and related historical data from the European Flood Awareness System, v4.0, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).*
- D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith, 2007. *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification Of Accuracy In Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, American Society of Agricultural and Biological Engineers, ISSN 0001-2351, Vol. 50(3): 885-900.*
- S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams, 2009. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Blackland Research Center, Texas AgriLife Research, Temple, Texas.*
- R. Niraula, L. M. Norman, T. Meixner, J. B. Callegary, 2012. *Multi-Gauge Calibration for Modeling the Semi-Arid Santa Cruz Watershed in Arizona-Mexico Border Area Using SWAT. University of Arizona, U.S. Geological Survey, Tucson, Arizona, Air, Soil and Water Research 2012:5 41–57.*
- Y. Panagopoulos, E. Dimitriou, 2020. *A Large-Scale Nature-Based Solution in Agriculture for Sustainable Water Management: The Lake Karla Case, Hellenic Centre for Marine Research, Institute of Marine Biological Resources and Inland Waters, Anavissos Attikis, Greece.*
- Y. Panagopoulos, C. Makropoulos, E. Baltas, M. Mimikou, 2011. *SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. National Technical University of Athens, Athens, Greece, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, Ecological Modelling 222 (2011) 3500– 3512.*
- M. Pikounis, E. Varanou, E. Baltas, A. Dassaklis, M. Mimikou, 2003. *Application of the SWAT Model in the Pinios River Basin Under Different Land–Use Scenarios. National Technical University of Athens, Global Nest: the Int. J. Vol. 5(2), pp 71-79, Lemnos, Greece.*
- V. Rafiej, A. Ghahramani, D. A. An-Vo, S. Mushtaq, 2020. *Modelling Hydrological Processes and Identifying Soil Erosion Sources in a Tropical Catchment of the Great Barrier Reef Using SWAT.*
- K. Y. Raneesh & G. Thampi Santosh (2011): *A study on the impact of climate change on streamflow at the watershed scale in the humid tropics. Hydrological Sciences Journal, 56:6, 946-965.*
- C. Santhi, J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, and L. M. Hauck, 2001. *Validation of the Swat Model on a Large River Basin with Point and Nonpoint Sources. Blackland Research Center, USDA/ARS, Temple, Texas, Texas Institute for Applied Environmental Research, Stephenville, Texas, Journal of the American Water Resources Association, Vol.37(5): 1169-1188.*
- R. M. B. Santos, L. F. S. Fernandes, R. M. V. Cortes, F. A. L. Pacheco, 2019. *Hydrologic Impacts of Land Use Changes in the Sabor River Basin: A Historical View and Future Perspectives. University of Trás-os-Montes and Alto Douro, University of Trás-os-Montes and Alto Douro, Vila Real, Portugal.*
- V. P. Singh, 2018. *Hydrologic modeling: progress and future directions. Texas A&M University, Texas.*

R. Srinivasan, T.S. Ramanarayanan, J. G. Arnold, and S. T Bednarz, 1998. *Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part II: Model Application*. Texas Agricultural Experiment Station, USDA-ARS, USDA-Natural Resource Conservation Service, Temple Texas. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34(1): 91-101.

M. Winchell, R. Srinivasan, M. Di Luzio, J. Arnold, 2013. *ArcSWAT Interface for SWAT2012 User's Guide*. Blackland Research and Extension Center, Texas AgriLife Research, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service, Temple, Texas.

C. Yacoub, A. Perez-Foguet, 2013. *Slope Effects on SWAT Modeling in a Mountainous Basin*. Research Group on Cooperation and Human Development, Institute of Sustainability, Universitat Politècnica de Catalunya, *Journal of Hydrologic Engineering* 18(12):1663-1673, Barcelona, Spain.

Ελληνική

Γενική Γραμματεία Φυσικού Περιβάλλοντος & Υδάτων Γενική Διεύθυνση Υδάτων Διεύθυνση Προστασίας και Διαχείρισης Υδάτινου Περιβάλλοντος, 2019. *Εφαρμογή Οδηγίας 2007/60/ΕΚ 1η Αναθεώρηση Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας*. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Αθήνα, Ελλάδα.

Εγκυκλοπαίδεια Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, 1996.

Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2017. *1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΕΛ08)*. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

Δ. Κουτσογιάννης, Α. Ανδρεαδάκης, Ρ. Μαυροδήμου, Α. Χριστοφίδης, Ν. Μαμάσης, Α. Ευστρατιάδης, Α. Κουκουβίνος, Γ. Καραβοκυρός, Σ. Κοζάνης, Δ. Μαμάης, Κ. Νουτσόπουλος, 2008. *Εθνικό Πρόγραμμα Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.

Ν. Μαμάσης, Α. Μαυροδήμου, Α. Ευστρατιάδης, Μ. Χαϊνταρλής, Α. Τέγος, Α. Κουκουβίνος, Π. Λαζαρίδου, Μ. Μαγαλιού, Δ. Κουτσογιάννης, 2007. *Διερεύνηση Σεναρίων Διαχείρισης Του Ταμιευτήρα Σμοκόβου*. Περιφέρεια Θεσσαλίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.

Μ. Α. Μιμίκου, Ε. Α. Μπαλτάς, 2018. *Τεχνική Υδρολογία*, 6^η Έκδοση. ISBN: 978-960-491-125-7, Αθήνα, Ελλάδα.

Περιφέρεια Θεσσαλίας, 2011. *Επιχειρησιακό Σχέδιο, Καλάθι Θεσσαλικών Προϊόντων*.

Β. Α. Τσιχριντζής, *Οικολογική Μηχανική και Τεχνολογία, Τόμος 1: Διαχείριση Απορροής, Ρύπων και Φερτών*, Έκδοση 2^η, 1999. Δημοκρήτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, Ελλάδα.

Ηλεκτρονικές Πηγές

<https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/guidance-determining-acceptability-environmental#fig1>

<http://drqungorese.blogspot.com/2014/04/swat-using-soil-data-for-non-us-study.html>

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/efas-historical?tab=overview>

<http://www.geodata.gov.gr/dataset?groups=boundaries>

<https://www.itia.ntua.gr/el/>

<https://www.thesqi.gr/el/kaliergies>

https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/water-cycle-greek?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

<https://www.greenoliver.gr/ta-10-megalytera-potamia-tis-elladas/>

<https://agrimetsoft.com/calculators/R-squared%20correlation>

https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_determination

https://en.wikipedia.org/wiki/Nash–Sutcliffe_model_efficiency_coefficient

https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/ESDBv3/Legend/Legend_Images/FAO85LV.jpg

<https://el.wikipedia.org/wiki/Πίνδος>

[https://el.wikipedia.org/wiki/Πηνειός_\(Θεσσαλία\)](https://el.wikipedia.org/wiki/Πηνειός_(Θεσσαλία))

https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-6-2005-1340_EN.html?redirect

<https://www.eea.europa.eu/el/pressroom/newsreleases/e-emphanes-allage-tou-klimatos>

https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/jrc-marsop4-7-weather_obs_grid_2019

<https://www.ypethe.gr>

https://marswiki.jrc.ec.europa.eu/agri4castwiki/index.php/File:Stations_rain_2020.jpg

https://marswiki.jrc.ec.europa.eu/agri4castwiki/index.php/Meteorological_data_from_ground_stations

<https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1?tab=mapview>

<http://www.hydroscope.gr>

<http://www.hnms.gr/emy/el/>

<https://www.larissa.gov.gr>

<https://swat.tamu.edu/software/mwswat/>

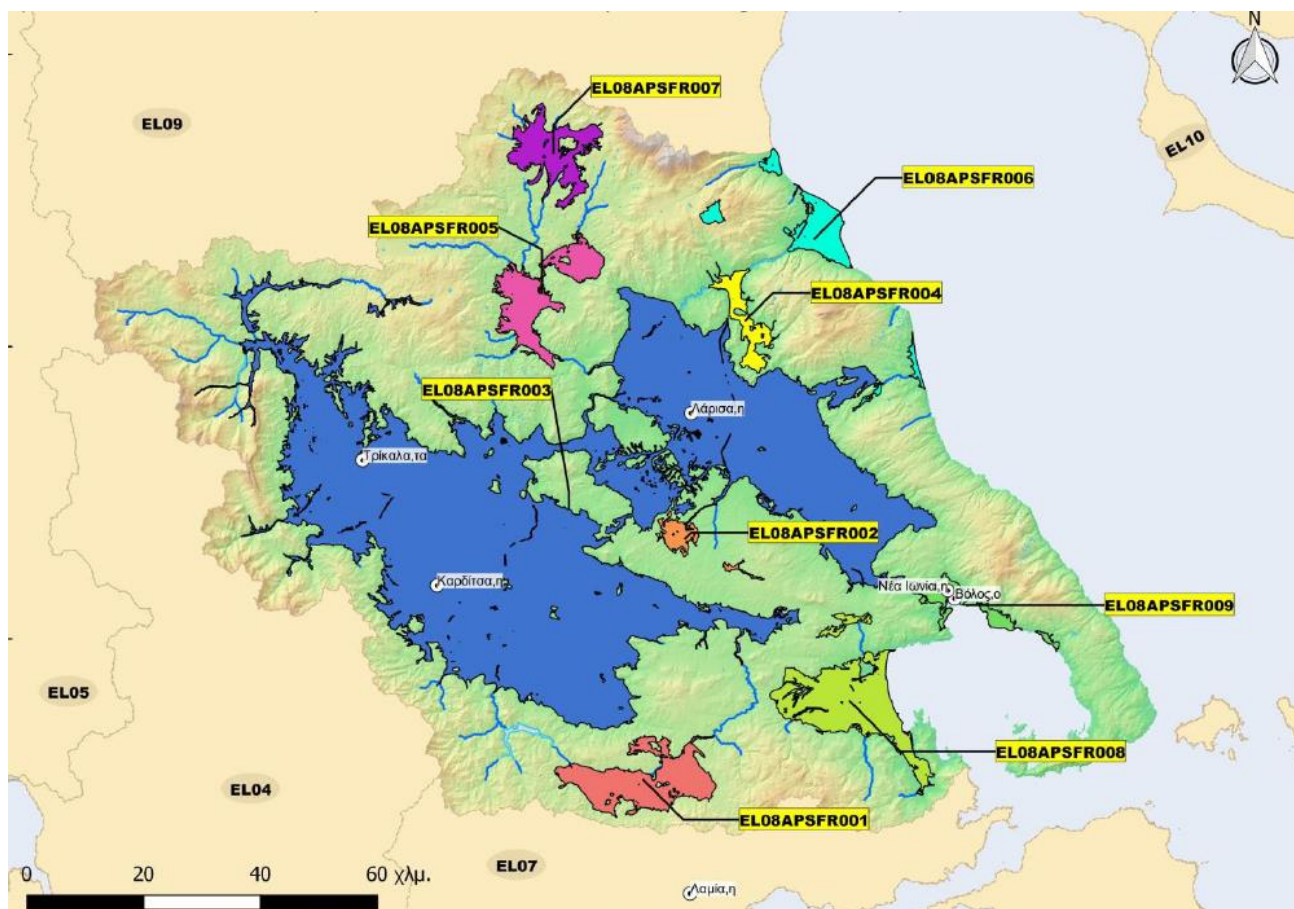
<https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/html>

<http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/fao-legend/key-to-the-fao-soil-units/en/>

https://www.card.iastate.edu/swat_articles/

https://dpi.pwe.tas.gov.au/Documents/Hydrological%20modelling_how%20and%20why%20it%20is%20used.pdf

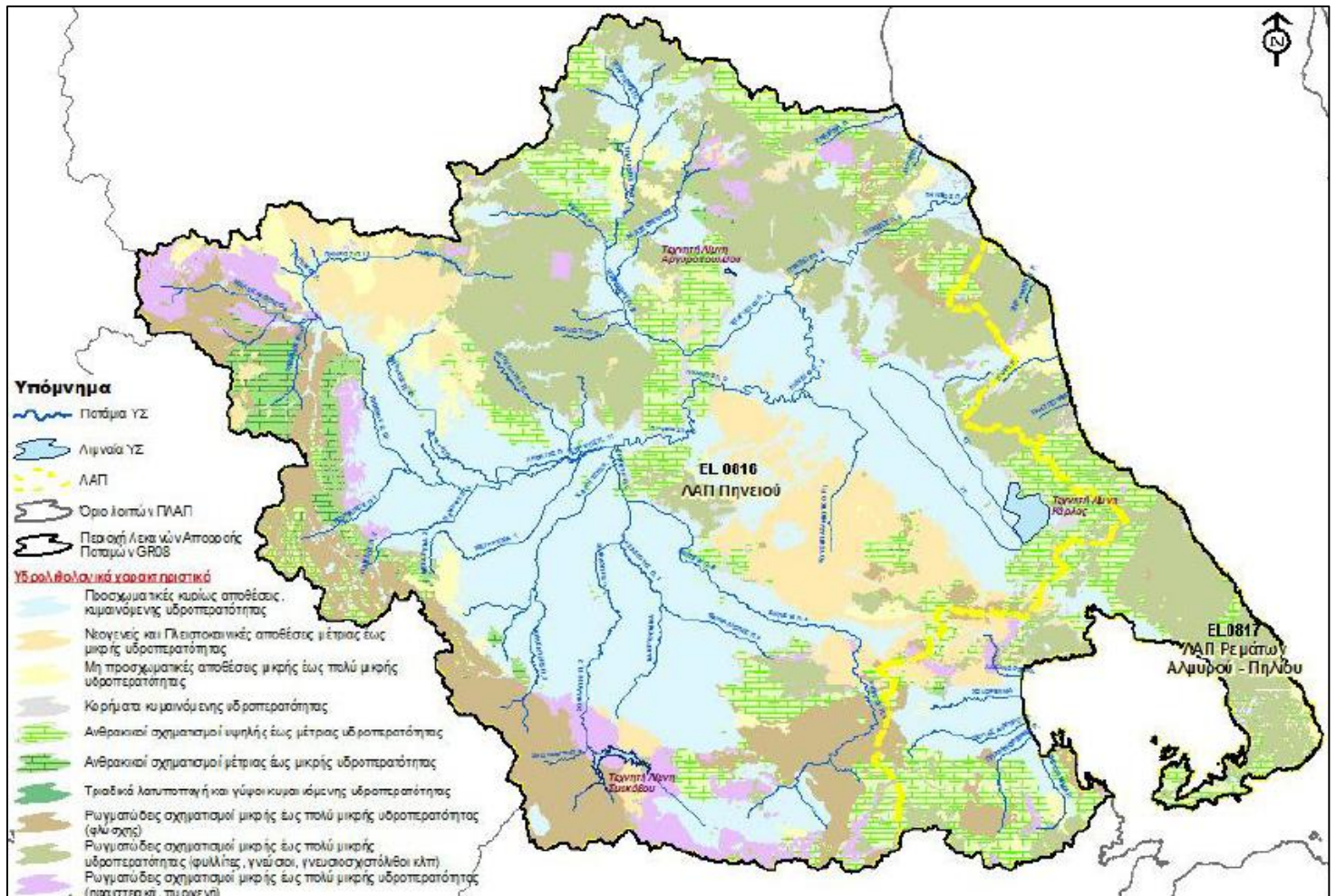
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



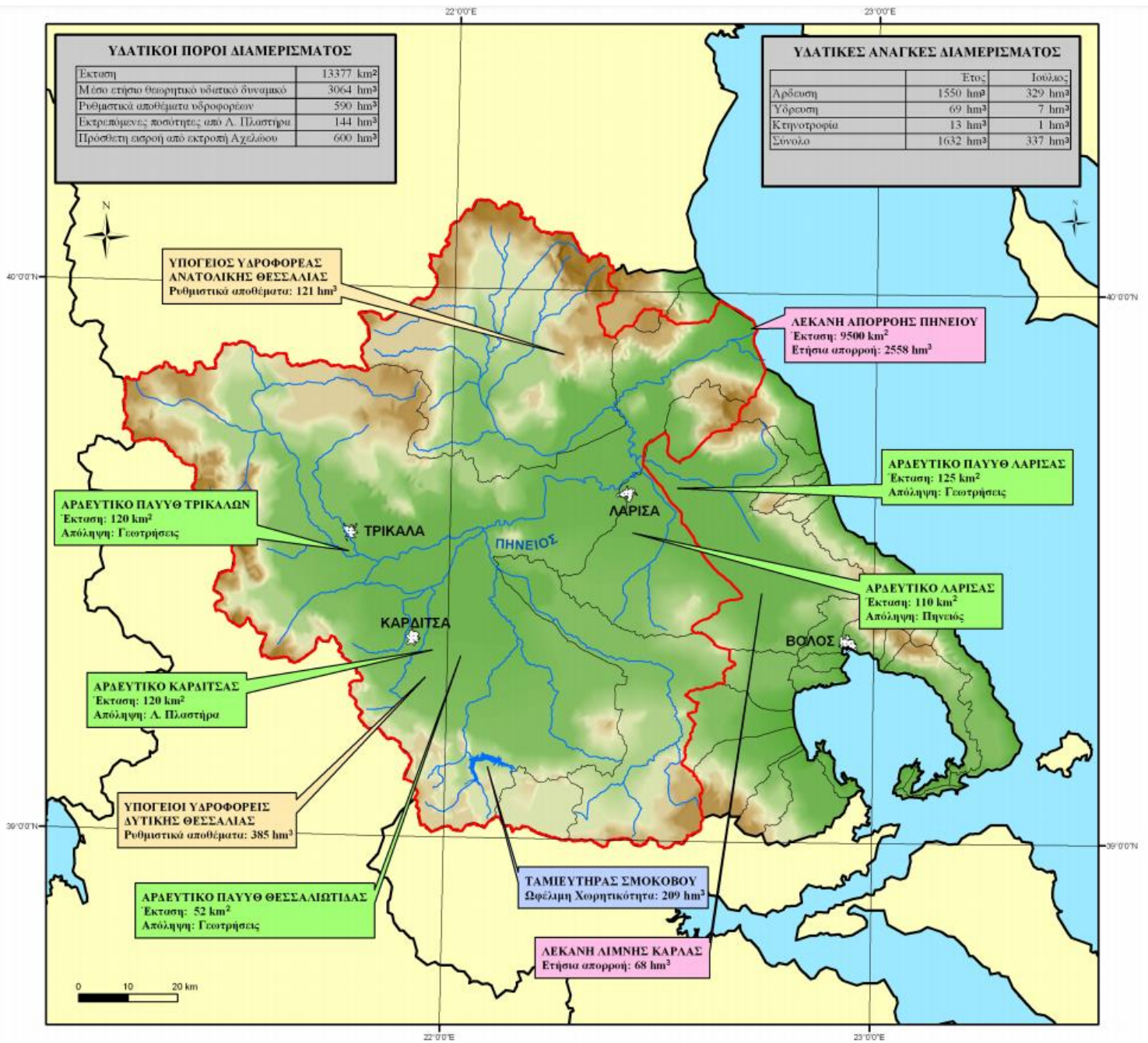
Εικόνα 41: Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας ΥΔ Θεσσαλίας (πηγή: ΥΠΕΝ, 2019)

Πίνακας 37: Υπόμνημα χάρτη κινδύνου πλημμύρας (ΥΠΕΝ, 2019)

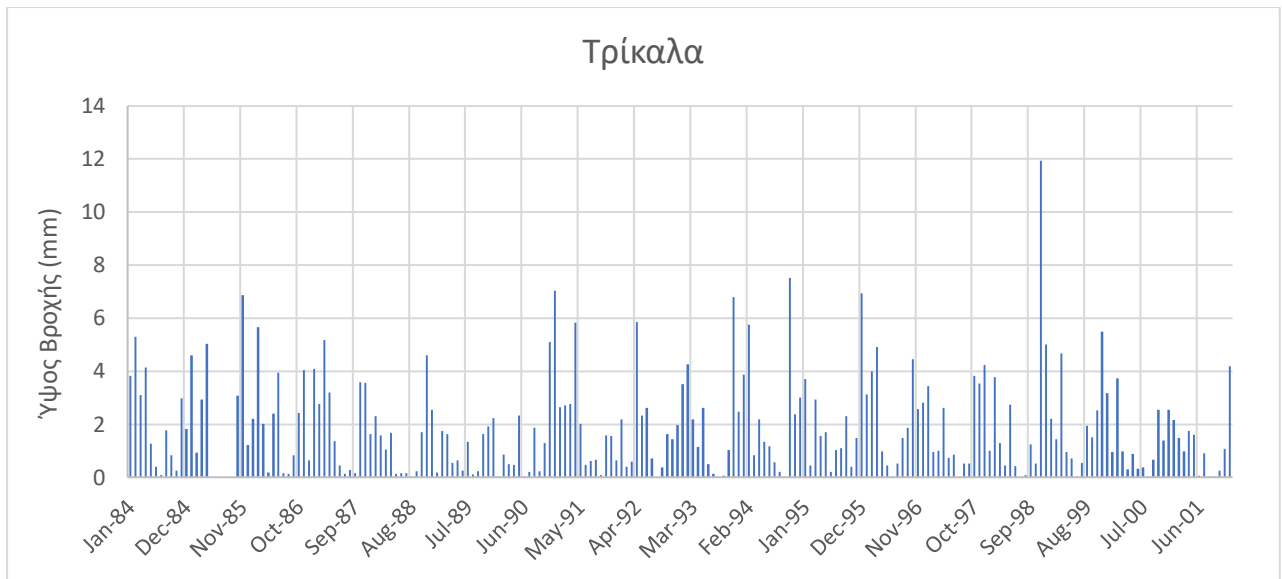
Κωδικός	Όνομασία	Έκταση (km ²)
EL08APSF001	Χαμηλή ζώνη άνω ρου ποταμού Ενιπέα, τάφρου Ξυνιάδας	174.7
EL08APSF002	Χαμηλή ζώνη λεκάνης άνω ρου ρέματος Κουσμπασανιώτικου	30.3
EL08APSF003	Ποταμός Πηνειός και παραπόταμοι μαζί με την κλειστή λεκάνη της λίμνης Κάρλας	3420.0
EL08APSF004	Χαμηλή ζώνη κλειστής λεκάνης Καλοχωρίου	54.5
EL08APSF005	Χαμηλή ζώνη μέσου ρου ποταμού Τιταρήσιου, περιοχή Ελασσώνας	138.8
EL08APSF006	Δέλτα ποταμού Πηνειού, Παραλία Κουλούρας – Παλαιοπύργου και χαμηλές ζώνες ρεμάτων Ζηλιάνας και Πουρί	100.1
EL08APSF007	Χαμηλή ζώνη άνω ρου ποταμού Τιταρήσιου	113.5
EL08APSF008	Χαμηλή ζώνη λεκανών ρεμάτων Αλμυρού, Χολόρεμμα και Λαχανόρεμμα του Νομού Μαγνησίας	236.2
EL08APSF009	Χαμηλή ζώνη λεκάνης χειμάρρου Ξηριά στο Βόλο και ρεμάτων της ευρύτερης περιοχής	47.7



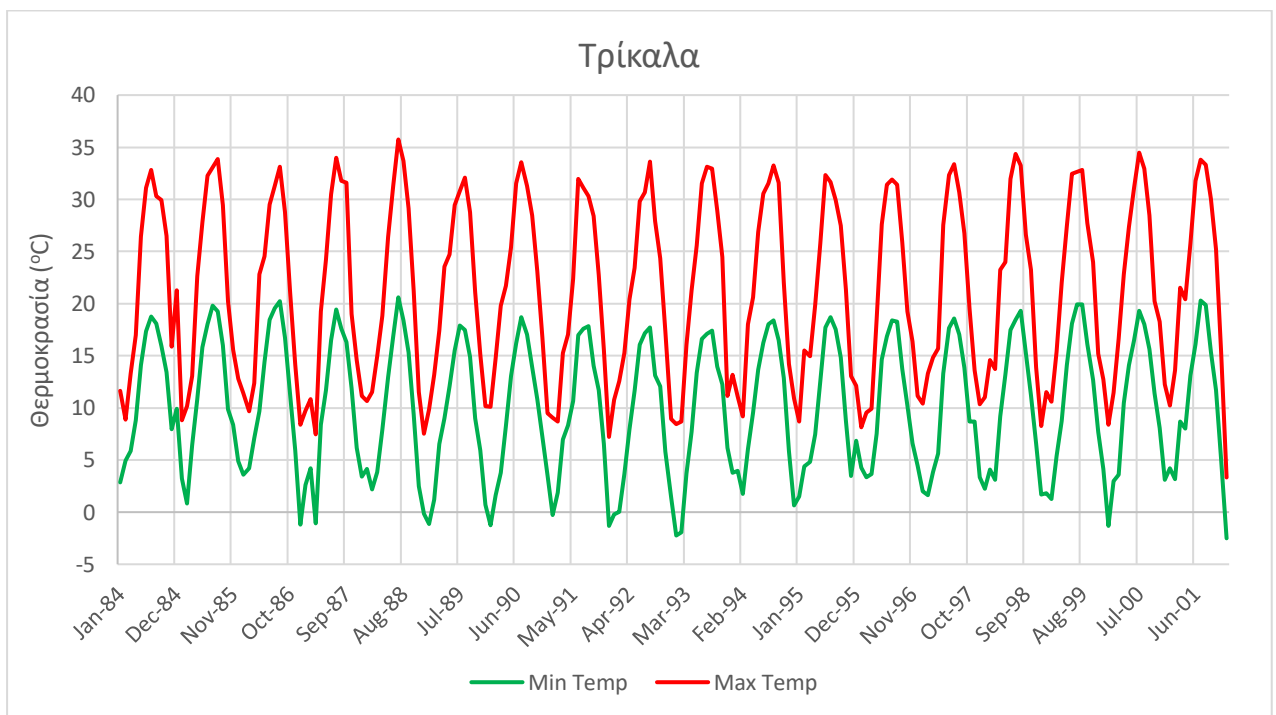
Εικόνα 42: Υδρογεωλογικός χάρτης ΥΔ Θεσσαλίας (πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2017)



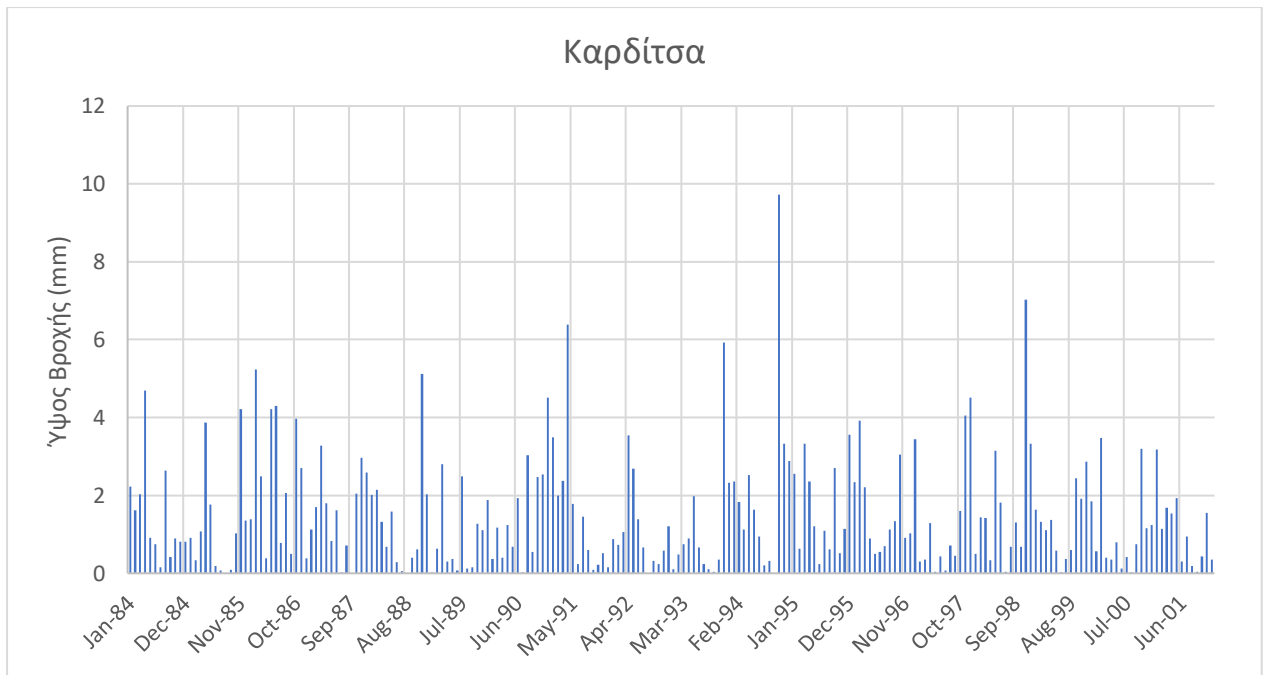
Εικόνα 43: Σημαντικότερα έργα διαχείρισης υδάτων στο ΥΔ Θεσσαλίας (πηγή: ΥΠ.Ε.ΘΕ.)



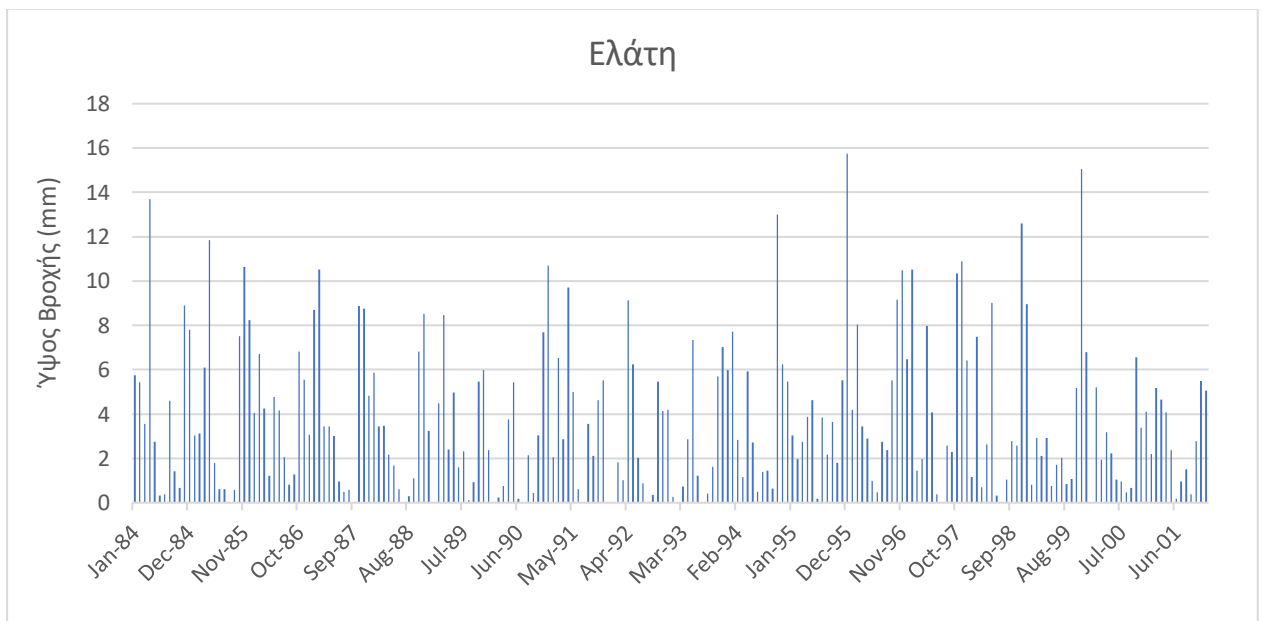
Εικόνα 44: Διάγραμμα μέσου ημερήσιου ύψους βροχής ανά μήνα στον σταθμό των Τρικάλων (πηγή: EMY)



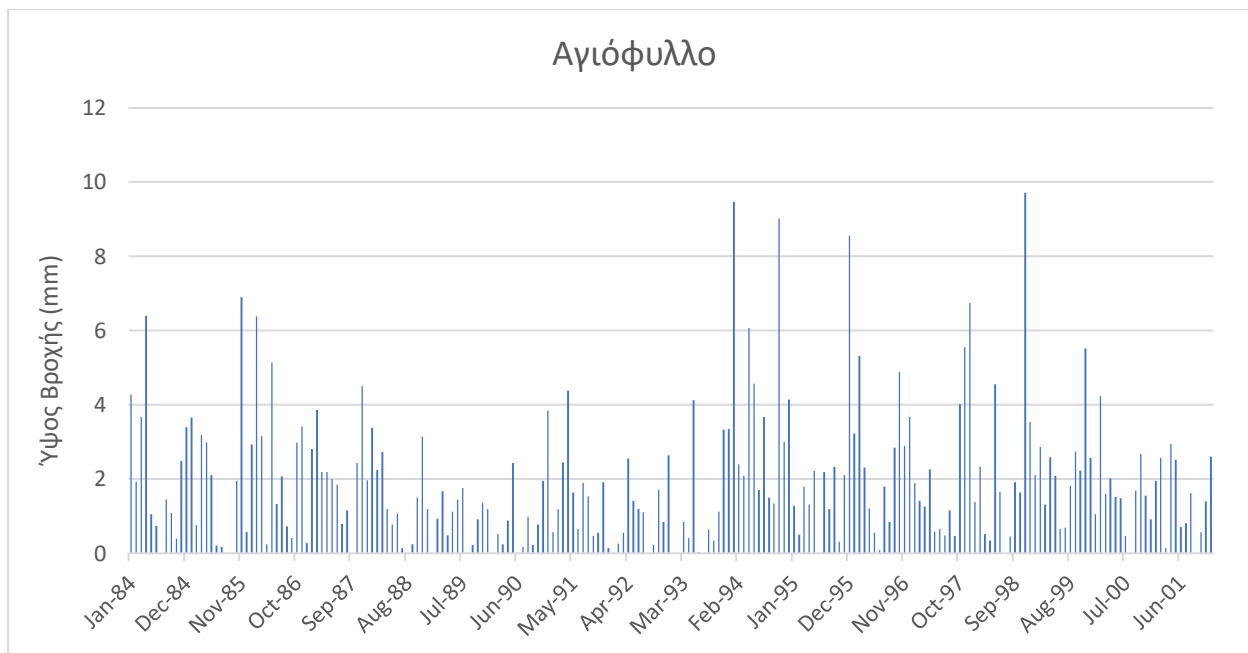
Εικόνα 45: Διάγραμμα μέσης ελάχιστης και μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας ανά μήνα στον σταθμό των Τρικάλων (πηγή: EMY)



Εικόνα 46: Διάγραμμα μέσου ημερήσιου ύψους βροχής ανά μήνα στον σταθμό της Καρδίτσας (πηγή: <http://www.hydroscope.gr>)



Εικόνα 47: Διάγραμμα μέσου ημερήσιου ύψους βροχής ανά μήνα στον σταθμό της Ελάτης (πηγή: <http://www.hydroscope.gr>)





Εικόνα 48: Διάγραμμα μέσου ημερήσιου ύψους βροχής ανά μήνα στον σταθμό του Αγιόφυλλου (πηγή: <http://www.hydroscope.gr>)





Corine land cover classes

1. Artificial surfaces




1.1 Urban fabric

-  1.1.1. Continuous urban fabric
-  1.1.2. Discontinuous urban fabric



1.2 Industrial, commercial and transport units

-  1.2.1. Industrial or commercial units
-  1.2.2. Road and rail networks and associated land
-  1.2.3. Port areas
-  1.2.4. Airports

1.3 Mine, dump and construction sites




-  1.3.1. Mineral extraction sites
-  1.3.2. Dump sites
-  1.3.3. Construction sites

1.4 Artificial, non-agricultural vegetated areas




-  1.4.1. Green urban areas
-  1.4.2. Sport and leisure facilities

2. Agricultural areas


2.1 Arable land

-  2.1.1. Non-irrigated arable land
-  2.1.2. Permanently irrigated land
-  2.1.3. Rice fields





2.2 Permanent crops

-  2.2.1. Vineyards
-  2.2.2. Fruit trees and berry plantations
-  2.2.3. Olive groves

2.3 Pastures




-  2.3.1. Pastures

2.4 Heterogeneous agricultural areas





-  2.4.1. Annual crops associated with permanent crops
-  2.4.2. Complex cultivation patterns
-  2.4.3. Land principally occupied by agriculture
-  2.4.4. Agro-forestry areas

3. Forest and seminatural areas






3.1 Forests

-  3.1.1. Broad-leaved forest
-  3.1.2. Coniferous forest
-  3.1.3. Mixed forest

3.2 Shrub and/or herbaceous vegetation associated



-  3.2.1. Natural grassland
-  3.2.2. Moors and heathland
-  3.2.3. Sclerophyllous vegetation
-  3.2.4. Transitional woodland shrub

3.3 Open spaces with little or no vegetation




-  3.3.1. Beaches, dunes, and sand plains
-  3.3.2. Bare rock
-  3.3.3. Sparsely vegetated areas
-  3.3.4. Burnt areas
-  3.3.5. Glaciers and perpetual snow

4. Wetlands

4.1 Inland wetlands



-  4.1.1. Inland marshes
-  4.1.2. Peat bogs

4.2 Coastal wetlands




-  4.2.1. Salt marshes
-  4.2.2. Salines
-  4.2.3. Intertidal flats

5. Water bodies

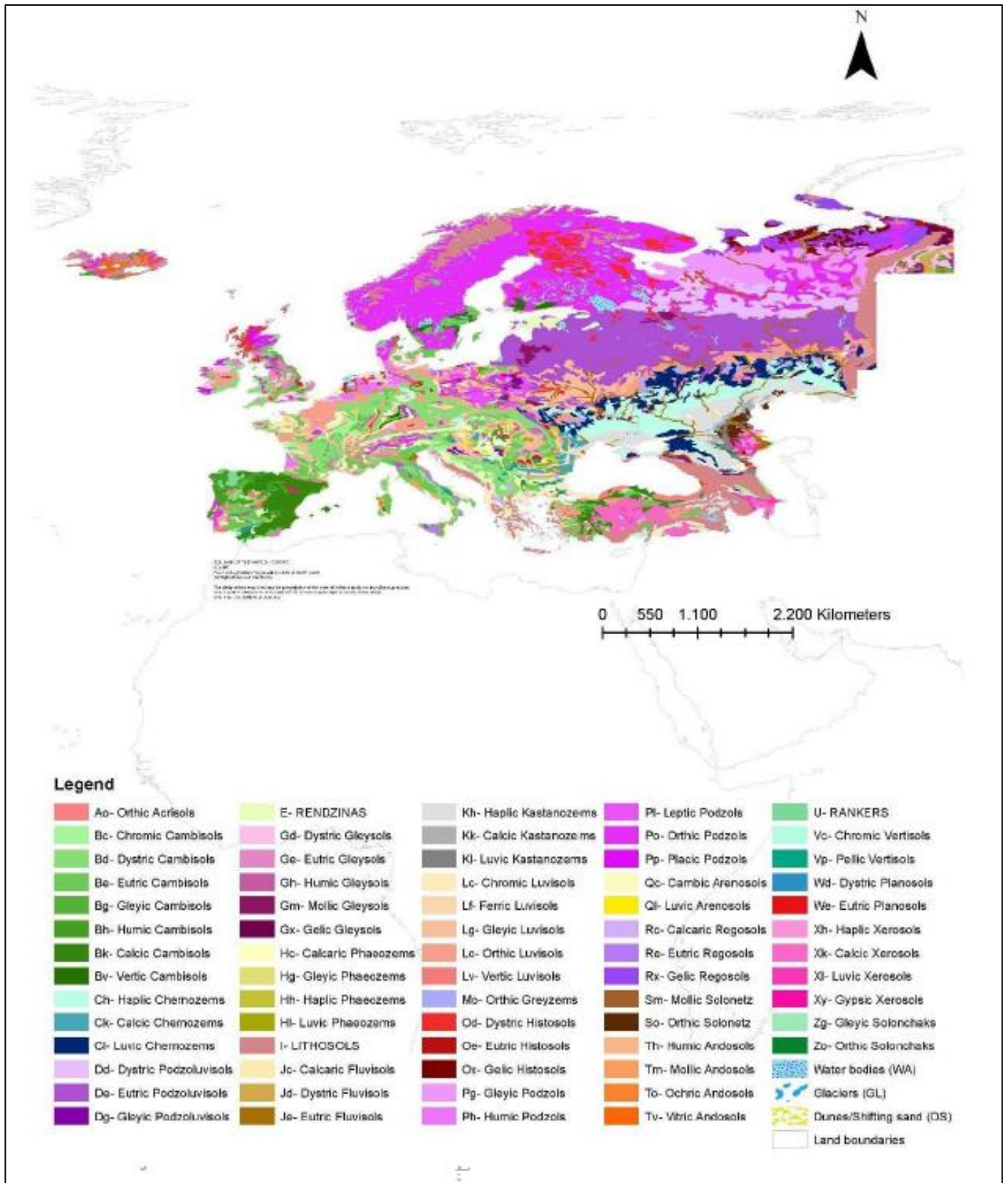
5.1 Inland waters

-  5.1.1. Water courses
-  5.1.2. Water bodies

5.2 Marine waters

-  5.2.1. Coastal lagoons
-  5.2.2. Estuaries
-  5.2.3. Sea and ocean

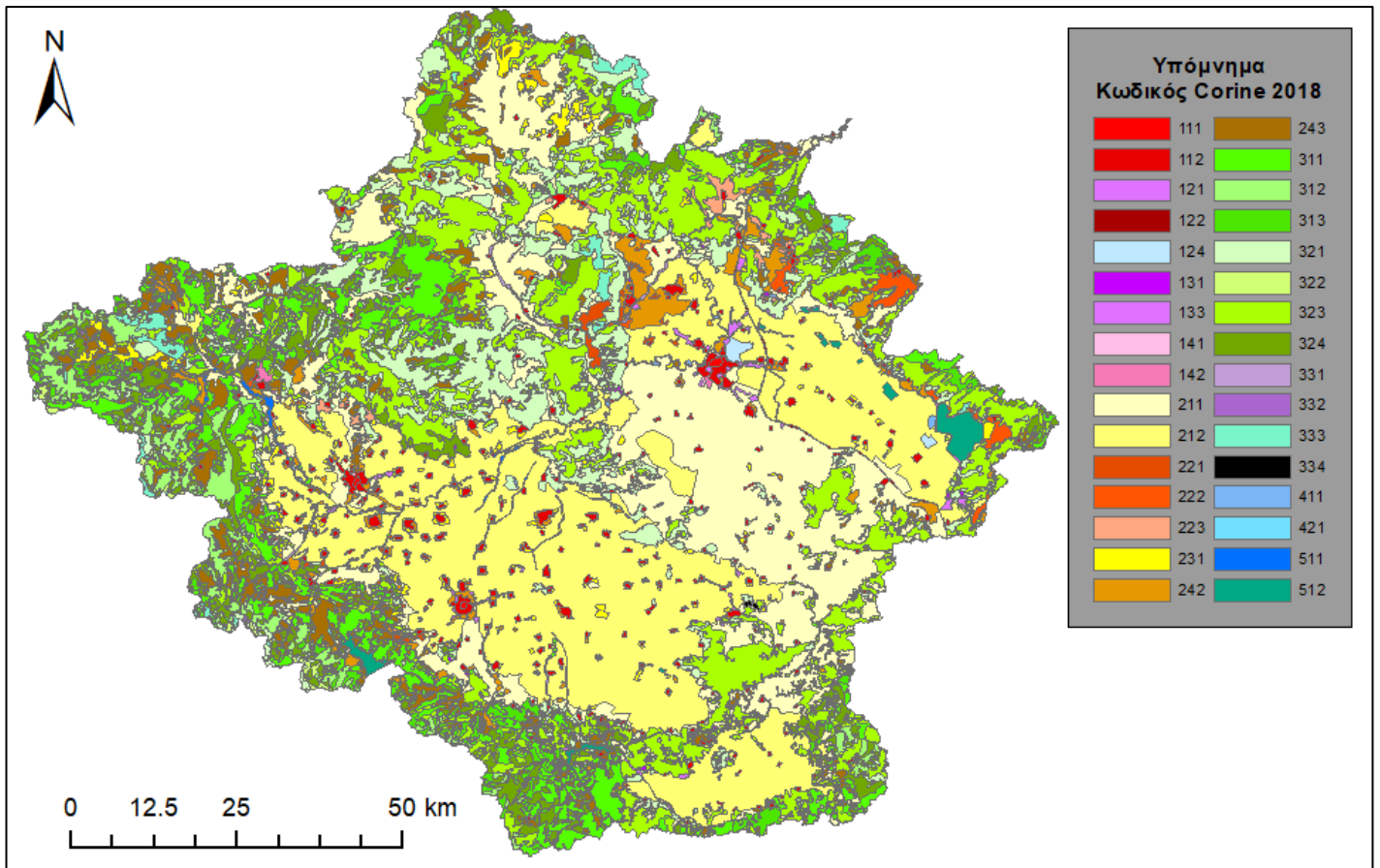
Εικόνα 49: Κατηγοριοποίηση χρήσεων γης κατά Corine 2018 (πηγή: <https://land.copernicus.eu>)



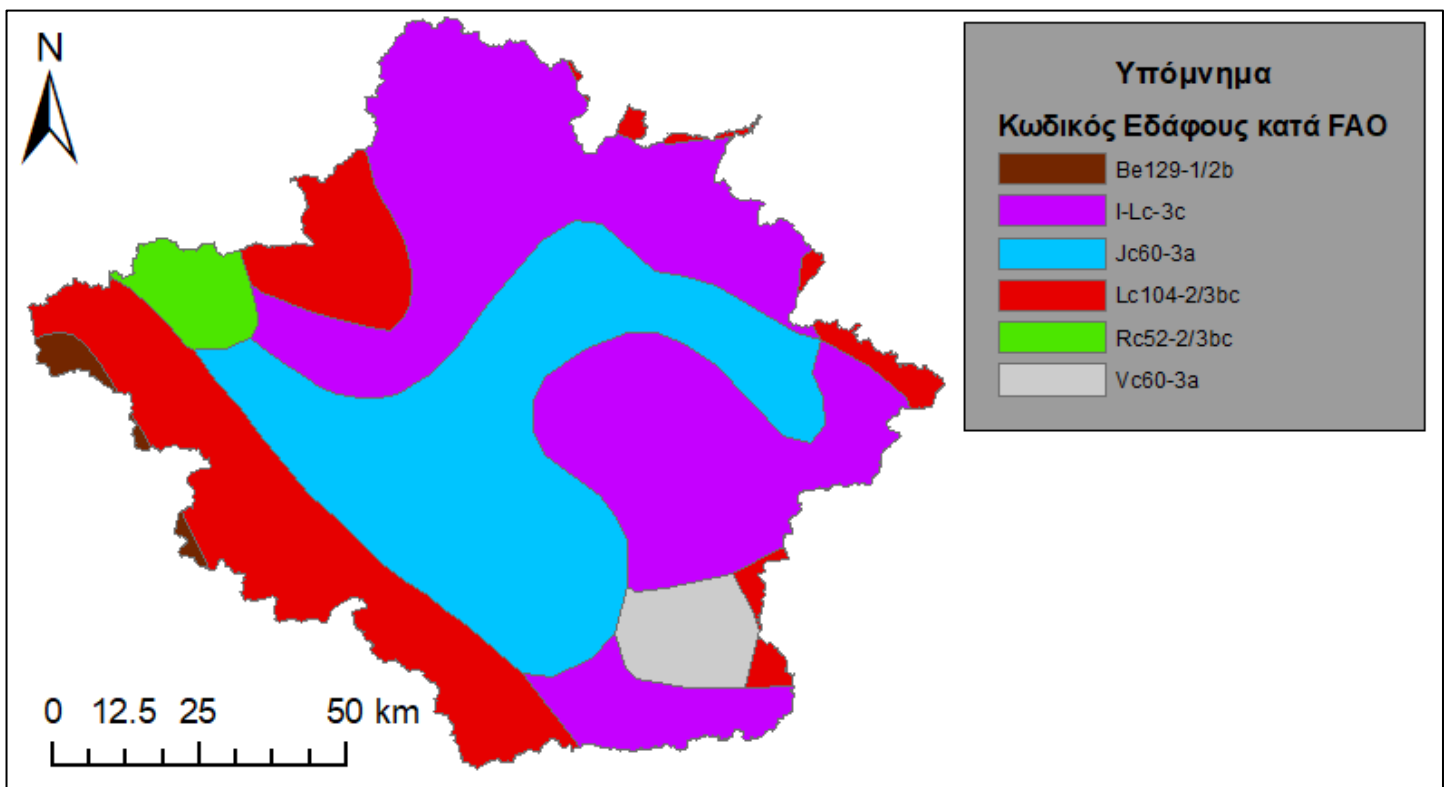
Εικόνα 50: Εδαφολογικός χάρτης της Ευρώπης με υπόμνημα (πηγή: FAO)

Πίνακας 38: Ονοματολογία κατηγοριών Corine που περιλαμβάνονται στην περιοχή μελέτης

Κωδικός Corine	Ονοματολογία στα ελληνικά
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη
133	Χώροι οικοδόμησης
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
211	Μη αρδευόμενη-αρόσιμη γη
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη
221	Αμπελώνες
222	Οπωρώνες
223	Ελαιώνες
231	Λιβάδια
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης
311	Δάσος πλατύφυλλων
312	Δάσος κωνοφόρων
313	Μικτό δάσος
321	Φυσικοί βοσκότοποι
322	Θάμνοι και χερσότοποι
323	Σκληρόφυλλη βλάστηση
324	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές
332	Απογυμνωμένοι βράχοι
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα
511	Ροές υδάτων
512	Συλλογές υδάτων



Χάρτης 16: Χάρτης χρήσεων γης εντός της λεκάνης (πηγή: Corine, 2018)



Χάρτης 17: Χάρτης εδάφους εντός της λεκάνης απορροής (πηγή: FAO, 2021)

USDA textural classification	Field capacity	Permanent wilting point	Available water capacity
	(m ³ /m ³)		
Sandy loam (Cambisols, Luvisols, Fluvisols, Leptosols, Stagnosols plus Gleysols)	0.231–0.375	0.068–0.221	0.137–0.210
Loam (Cambisols, Luvisols, Chernozems, Leptosols, Stagnosols plus Gleysols)	0.211–0.363	0.083–0.224	0.108–0.210
Silty loam (Cambisols, Luvisols, Fluvisols, Chernozems, Stagnosols plus Gleysols)	0.236–0.362	0.138–0.258	0.080–0.169
Sandy clay loam (Chernozems)	0.375	0.221	0.154
Silty clay loam (Luvisols, Fluvisols, Chernozems)	0.294–0.303	0.170–0.243	0.060–0.125
Clay loam (Fluvisols, Leptosols)	0.294–0.311	0.203–0.214	0.080–0.108

USDA – U.S. Department of Agriculture; USDA textural classification – classification according to the Soil Science Division Staff (2017)

Εικόνα 51: Ενδεικτικές τιμές της διαθέσιμης χωρητικότητας νερού στο έδαφος για διάφορους τύπους εδάφους (πηγή: USDA, 2017)

Characteristics of Channel	Median	Range
Excavated or dredged		
Earth, straight and uniform	0.025	0.016-0.033
Earth, winding and sluggish	0.035	0.023-0.050
Not maintained, weeds and brush	0.075	0.040-0.140
Natural streams		
Few trees, stones or brush	0.050	0.025-0.065
Heavy timber and brush	0.100	0.050-0.150

Εικόνα 52: Πίνακας τιμών συντελεστή Manning εντός του υδατορέματος (πηγή: Chow, 1959; J. G. Arnold et al., 2012)

Περιγραφή		% Αδιαπερατότητας	Υδρολογικές Κατηγορίες Εδαφών			
Τύπος Κάλυψης	Υδρολογική Κατάσταση		A	B	C	D
Ανοικτοί χώροι (κήποι, πάρκα, γρασίδι, κοιμητήρια, γήπεδα γκολφ, κλπ)	Άσχημη κατάσταση (κάλυψη με γρασίδι <50%)		68	79	86	89
	Μέση κατάσταση (κάλυψη με γρασίδι 50-75%)		49	69	79	84
	Καλή κατάσταση (κάλυψη με γρασίδι >50%)		39	61	74	80
Αδιαπέρατες επιφάνειες	Στρομμένοι ανοικτοί χώροι στάθμευσης, στέγες, ταρράτσες, κλπ		98	98	98	98
Δρόμοι και αρτηρίες	Στρομμένοι, με κράσπεδα και υπονόμους ομβρίων		98	98	98	98
	Στρομμένοι, με ανοικτά στραγγιστικά χαντάκια στις άκρες		83	89	92	93
	Χαλκόστρωτοι		76	85	89	91
	Χωματόδρομοι		72	82	87	89
Αστικές περιοχές	Εμπορικές ζώνες	85	89	92	94	95
	Βιομηχανικές ζώνες	72	81	88	91	93
Αστικές περιοχές με κατοικίες μιάς οικογένειας σε οικόπεδα (βάσει μεγέθους οικοπέδου)	0.05 ha = 0.5 στρέμμα	65	77	85	90	92
	0.1 ha = 1.0 στρέμμα	38	61	75	83	87
	0.13 ha = 1.3 στρέμματα	30	57	72	81	86
	0.2 ha = 2 στρέμματα	25	54	70	80	85
	0.4 ha = 4 στρέμματα	20	51	68	79	84
	0.8 ha = 8 στρέμματα	12	46	65	77	82
Νέες περιοχές κατοικιών υπό κατασκευή	Διαπερατές επιφάνειες χωρίς γρασίδι		77	86	91	94
Κενά οικόπεδα	από τον Πίνακα 2.27					

Εικόνα 53: Αριθμοί CN για αστικές χρήσεις γης κατά SCS 1986 (πηγή: Τσιχριντζής, 1999)

Χρήση Γης	Επιφάνεια ή γεωργική πρακτική	Υδρολογική Κατάσταση	Υδρολογικές Κατηγορίες Εδαφών			
			A	B	C	D
Γεωργική γη που έχει μείνει ακαλλιέργγητη			77	86	91	94
Διάφορες καλλιέργειες	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοϋψείς)	Άσχημη	72	81	88	91
		Καλή	67	78	85	89
	Ακολουθώντας τις ισοϋψείς	Άσχημη	70	79	84	88
		Καλή	65	75	82	86
	Ακολουθώντας τις ισοϋψείς με ταρράτσωμα	Άσχημη	66	74	80	82
		Καλή	62	71	78	81
Μικρόκοκκες καλλιέργειες	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοϋψείς)	Άσχημη	65	76	84	88
		Καλή	63	75	83	87
	Ακολουθώντας τις ισοϋψείς	Άσχημη	63	74	82	85
		Καλή	61	73	81	84
	Ακολουθώντας τις ισοϋψείς με ταρράτσωμα	Άσχημη	61	72	79	82
		Καλή	59	70	78	81
Λαχανικά ή εναλασόμενες καλλιέργειες	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοϋψείς)	Άσχημη	66	77	85	89
		Καλή	58	72	81	85
	Ακολουθώντας τις ισοϋψείς	Άσχημη	64	75	83	85
		Καλή	55	69	78	83
	Ακολουθώντας τις ισοϋψείς με ταρράτσωμα	Άσχημη	63	73	80	83
		Καλή	51	67	76	80
Βοσκότοπος, κτηνοτροφική περιοχή	Σε ευθεία γραμμή (κάθετα στις ισοϋψείς)	Άσχημη	68	79	86	89
		Μέση	49	69	79	84
		Καλή	39	61	74	80
	Ακολουθώντας τις ισοϋψείς	Άσχημη	47	67	81	88
		Μέση	25	59	75	83
		Καλή	6	35	70	79
Λιβάδια		Καλή	30	58	71	78
Δασικές εκτάσεις	Άσχημη	45	66	77	83	
	Μέση	36	60	73	79	
	Καλή	25	55	70	77	
Φάρμες			59	74	82	86
Δρόμοι	Χωματόδρομοι		72	82	87	89
	Με σκληρή επιφάνεια		74	84	90	92

Εικόνα 54: Αριθμοί καμπύλης CN για γεωργικές λεκάνες (πηγή: Τσιχριντζής, 1999)