



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

Υδρολογική-Υδραυλική προσομοίωση στον Πάμισο ποταμό
Θεσσαλίας

Πετρίτσης Ελευθέριος

Επιβλέπων: Μπαλτάς Ευάγγελος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Πίνακας περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
ABSTRACT.....	vii
EXTENDED ABSTRACT.....	viii
Introduction.....	viii
Thesis Chapters	viii
Materials and Methods	ix
Study area.....	ix
Data used.....	x
Hydrological Analysis.....	x
Hydraulic Analysis.....	xiv
Results and discussion.....	xiv
Hydrological analysis	xiv
Hydraulic analysis.....	xvii
Sensitivity Analysis	xx
Parameter CN.....	xx
Conclusions.....	xxi
Selected References	xxiii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας	2
1.3 Γενικά.....	3
1.3.1 Υδρολογικός κύκλος	3
1.3.2 Τι είναι πλημμύρα.....	4
1.3.3 Κατηγορίες πλημμυρών	5
1.3.4 Αίτια των πλημμυρών	5
1.3.5 Αντιμετώπιση των πλημμυρών	6
1.3.6 Οδηγία 2007/60/ΕΚ.....	7
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	9
2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά.....	9
2.1.1 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά	9
2.1.2 Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.....	11

2.1.3 Γεωλογικά χαρακτηριστικά	15
2.1.4 Κλιματικά χαρακτηριστικά	16
2.2 Ανθρωπογενή χαρακτηριστικά.....	17
2.2.1 Πληθυσμός	17
2.2.2 Οικονομία.....	18
2.2.3 Χρήσεις γης	19
2.3 Ιστορικό πλημμυρών	21
2.3.1 Ιστορικά γεγονότα πλημμύρας	21
2.3.2 Ανάλυση μηχανισμών πλημμύρας.....	22
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	24
3.1 Περιβάλλον εργασίας-λογισμικά	24
3.2 Γεωμορφολογική ανάλυση	24
3.2.1 Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών – Το λογισμικό ArcGIS.....	24
3.2.2 Γεωγραφικά δεδομένα.....	26
3.2.3 Υλοποίηση γεωμορφολογικής ανάλυσης	27
3.3 Υδρολογική ανάλυση.....	33
3.3.1 Υετογράφημα σχεδιασμού.....	33
3.3.2 Μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος	36
3.3.3 Το μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών.....	37
3.3.4 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder	42
3.3.5 Εκτίμηση υδρολογικών απωλειών με την μέθοδο SCS CN	44
3.3.6 Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών της υπολεκάνης μελέτης	47
3.3.7 Υδρολογική ανάλυση μέσω του λογισμικού HEC-HMS	49
3.3.8 Εφαρμογή της μεθόδου Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη στο λογισμικό HEC-HMS.....	54
3.3.9 Εφαρμογή του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά στο λογισμικό HEC-HMS	56
3.4 Υδραυλική Προσομοίωση	57
3.4.1 Το λογισμικό HEC-RAS.....	57
3.4.2 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό HEC-RAS.....	60
3.4.3 Εφαρμογή υδραυλικής προσομοίωσης μέσω του λογισμικού HEC-RAS	61
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	65
4.1 Αποτελέσματα υδρολογικής ανάλυσης	65
4.2 Αποτελέσματα υδραυλικής προσομοίωσης	68
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	71

5.1 Εισαγωγή	71
5.2 Μέθοδος «Once at a time»	72
5.3 Ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN	72
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	77
6.1 Σύνοψη	77
6.2 Γενικά συμπεράσματα	77
6.3 Ειδικά συμπεράσματα.....	78
6.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	78
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	80

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον κ. Ευάγγελο Μπαλτά, Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγησή του και γενικότερα για τις γνώσεις που μου μετέδωσε τόσο κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας όσο και κατά την διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών στα μαθήματα κορμού της σχολής όπως και της κατεύθυνσης.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π και κ. Νικόλαο Μαμάση, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου καθώς και για τις επισημάνσεις και χρήσιμες παρατηρήσεις τους στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας μέσω της συμμετοχής τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω την κ. Αιμιλία Θεοχάρη, Υποψήφια Διδάκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π για τη διαρκή υποστήριξή της, το χρόνο που διέθεσε, τις γνώσεις που μου προσέφερε καθώς και τη γενικότερη συμβολή της για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξή τους σε κάθε μου βήμα.

Ελευθέριος Πετρίτσας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί το φαινόμενο της πλημμύρας. Το φυσικό αυτό φαινόμενο εμφανίζεται σε πολλές χώρες του κόσμου εδώ και πάρα πολλά χρόνια και γίνονται σημαντικές προσπάθειες για την πρόληψη και μετέπειτα αντιμετώπισή του ώστε να περιοριστούν στο κατά το δυνατό μεγαλύτερο βαθμό οι επιπτώσεις του στο περιβάλλον και στην κοινωνία.

Η περιοχή μελέτης της εργασίας βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα της Θεσσαλίας 28 km δυτικά του δήμου Καρδίτσας και πρόκειται για υπολεκάνη απορροής με έκταση 139 km^2 . Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή του Μουζακίου που βρίσκεται κατάντη της περιοχής μελέτης όπου πραγματοποιείται η υδραυλική προσομοίωση.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στην περιοχή μελέτης. Αρχικά, με δεδομένο το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) και με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS και της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS υλοποιήθηκε η γεωμορφολογική ανάλυση της περιοχής μελέτης. Στη συνέχεια ακολούθησε η υδρολογική ανάλυση της υπολεκάνης απορροής μέσω της πλατφόρμας HEC-HMS προκειμένου να υπολογιστεί το πλημμυρογράφημα στην έξοδό της. Η μετατροπή της βροχής σε απορροή πραγματοποιήθηκε εφαρμόζοντας τη μέθοδο Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από το Χρήστη, το οποίο υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών στο λογισμικό ArcGIS, και τη μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder. Η εκτίμηση των απωλειών βροχόπτωσης υλοποιήθηκε με τη μέθοδο Soil Conservation Service (SCS) Curve Number (CN) και η κατανομή της βροχόπτωσης μέσω της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ. Επίσης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ καθώς και της δυσμενέστερης διάταξης μέσω της μεθόδου του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη. Έπειτα, με χρήση του λογισμικού HEC-RAS ακολούθησε η υδραυλική προσομοίωση στην έξοδο της υπολεκάνης όπου αφορά την περιοχή του Μουζακίου. Έγινε υπολογισμός του βάθους και της ταχύτητας ροής του. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας με την μέθοδο «Once at a time» για την παράμετρο CN ώστε να εξεταστεί η επιρροή της μεταβολής των τιμών της στην αιχμή του πλημμυρογραφήματος.

Λέξεις- κλειδιά: Πλημμύρα, ΨΜΕ, Εναλλασσόμενα μπλοκ, Ανάλυση ευαισθησίας, Μουζάκι.

ABSTRACT

The subject study of this diploma thesis is the flood phenomenon. This natural phenomenon appears in many countries in the world for many years and considerable efforts are being made to prevent and subsequently address it in order to reduce its impact on the environment and society as much as possible.

The study area where flood risk takes place is located in the Region Unit of Thessaly 28 km west of the Municipality of Karditsa with an area of 139.40 km^2 . Of particular interest is the area of Mouzaki under the study area where the hydraulic simulation takes place.

It is therefore easily understood that the purpose of this study is to assess flood risk in the study area. Initially, given the Digital Elevation Model (DEM) and with the ArcGIS program and HEC-GeoHMS toolbar the geomorphic analysis of the area was implemented. The hydrological analysis of the study area was then followed through the HEC-HMS platform. The calculation of direct runoff was performed through the method of User Specified Unit hydrograph through isochronous curves and Snyder Synthetic Unit Hydrograph to export flow hydrograph. The estimation of rainfall losses was implemented by the SCS CN method and the distribution of rainfall through the method of alternating blocks. Also, the results of alternating block method as well as worst profile method is compared through User Specified Unit hydrograph method. Then using HEC-RAS software, the hydraulic simulation took place, downstream of the study area of Mouzaki. An assessment was made of the area of the flood field and its depth and flow velocity calculation. Finally, sensitivity analysis was performed using the << Once at a time >> method on CN parameter to observe if any change is largely affecting the results.

Key-words: Flood, DEM, Alternating blocks, Sensitivity analysis, Mouzaki.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Floods events are common, disastrous and occurs globally. In Asia countries like India, China, Philippines, Iran, Bangladesh and Nepal are exposed to frequent flood incidents (WWAP , 2006). It is easily understood that flood hazards are frequent to developing countries who lack of properly infrastructure and mechanisms to face up with this physical phenomenon. The effects of flood disasters in developing countries are worsening due to a self-exited poverty-cycle phenomenon (Osti, 2004). Unless effective coping measures are properly established in advance, this phenomenon of destruction due to floods in developing countries will continue. Of course, serious problems also happens because of floods in developed countries and the existing infrastructure and mechanisms to deal with floods can improve. In Europe, the EU passed Directive 2007/60 on flood risk assessment and management. Every EU member is obligated to make an assessment in order to recognize river basins and coastal areas that are risk of flooding under the terms of this Directive. Those flood risk maps and flood risk management strategies should be developed for such areas with the goal of avoiding the negative Effects of floods.

The aim of this thesis is to evaluate flood risk in basin of Mouzaki. Initially, the geomorphological analysis of the area was conducted. Then hydrological analysis was performed in order to calculate the direct runoff and export unit hydrograph. Then, hydraulic simulation was executed in the area of Mouzaki. The results of this study highlights the importance of the floodplans , as is very important for flood risk management. Finally, sensitivity analysis was performed using the << Once at a time >> method on CN parameter to observe if any change of the parameter is largely affecting the results.

Thesis Chapters

The thesis is consisted of 6 chapters as described below:

- Chapter 1 : Introduction
- Chapter 2 : Study area
- Chapter 3: Methodology
- Chapter 4 : Results
- Chapter 5 : Sensitivity analysis
- Chapter 6: Conclusions

Materials and Methods

Study area

The study area is a subbasin that is located in the Region Unit of Thessaly 28 km west of the Municipality of Karditsa. It covers an area of about 139.40 km^2 . More specifically, a large part of the study area belongs to the Municipality of Mouzaki, while a small part is part of the municipalities of Argithea and Lake Plastira. It is also bordered by the Municipality of Pylis in the Northwest part of the study area. This subbasin was selected because of the high frequency of flood events occurring downstream at Mouzaki region as well as the significant agricultural activity that takes place in this area. The main river of this study area is Pineios with length of 205 km. The area is characterized by simple geomorphological features, with mountainous and lowlands areas. The geology of the study area is mainly covered by flysch of Pidnos in the largest part of the area as well as limestone of Pidnos in a smallest part of the area. Concerning the land use of the area, it consists of a large proportion of land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation (31.04%), broad-leaved forest land (18.99%), transitional woodland-shrub (13.70%) and coniferous forest land (13.54%). The annual rainfall in the meteorological station of Mouzaki is considered 1142 mm. The average annual rainfall of Thessaly is 678 mm. Concerning the elevation of the study area it ranges from 204 m to 1989 m with a mean elevation of 819 m as shown in Figure 1.

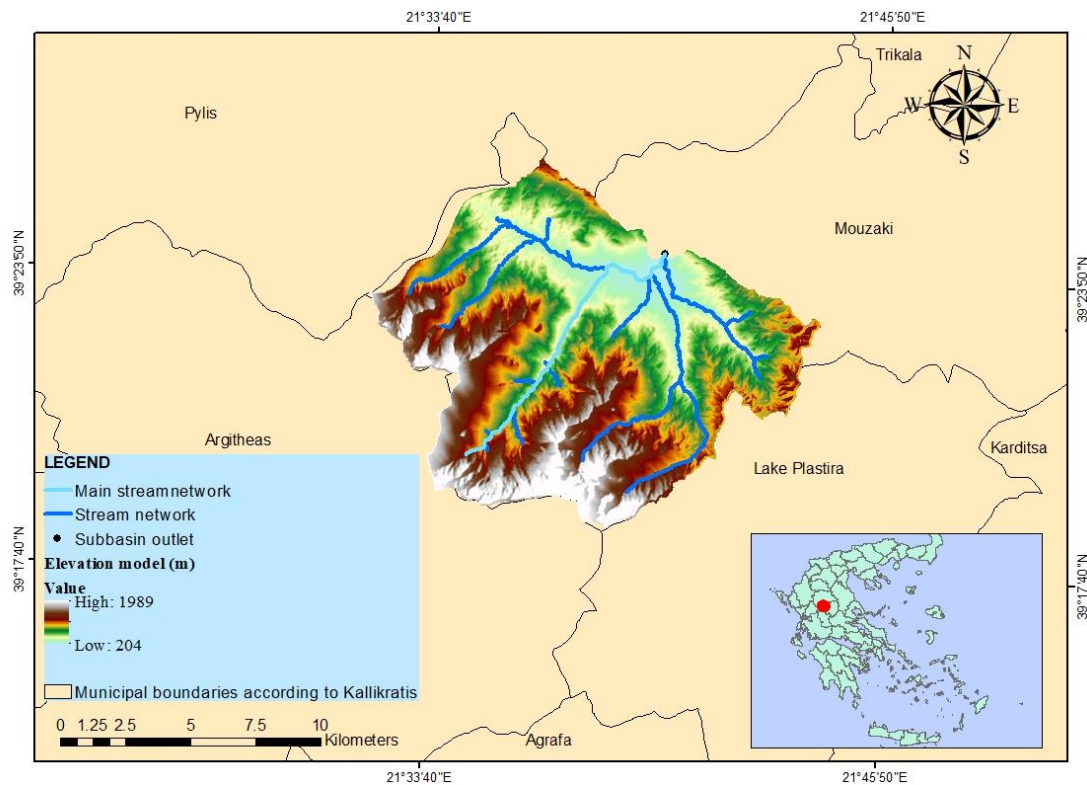


Figure 1: Study area

Data used

The datasets on which the analysis was based are the DEM for hydrological simulations, Corine Land Cover (2018) in order to analyze land cover as well as other geomorphological and hydrological attributes that created by DEM, such as the slope and streams definition. Also, the soil type according to SCS method is taken into consideration. The DEM was provided by the National Cadastre and Mapping Agency S.A, with a cell size of 5 x 5 m.

Hydrological Analysis

The hydrology analysis is based on the theory of unit hydrograph. In order to produce this hydrograph two methods are being applied: User Specified Unit hydrograph through isochrones curves and Snyder Synthetic Unit Hydrograph for comparison purposes.

First of all, isochrones curves method is based on the time area method. The time area method is based on the recognition of the importance of the time distribution of rainfall on runoff (Singh, 1992). The essential thought of such methods is the time area histogram, which demonstrates the distribution of partial watershed areas contributing to runoff at the watershed outlet as function of travel time. These areas are bordered by isochrones curves. With the term “isochrone” it means a contour that joins those areas over the watershed that are of the same travel time to the basin outlet. The isochrones

cannot cross one another, they cannot close and can only originate or terminate on the watershed boundary (Singh, 1992). The flow chart of this method is presented below in Figure 2 and executed in GIS environment.

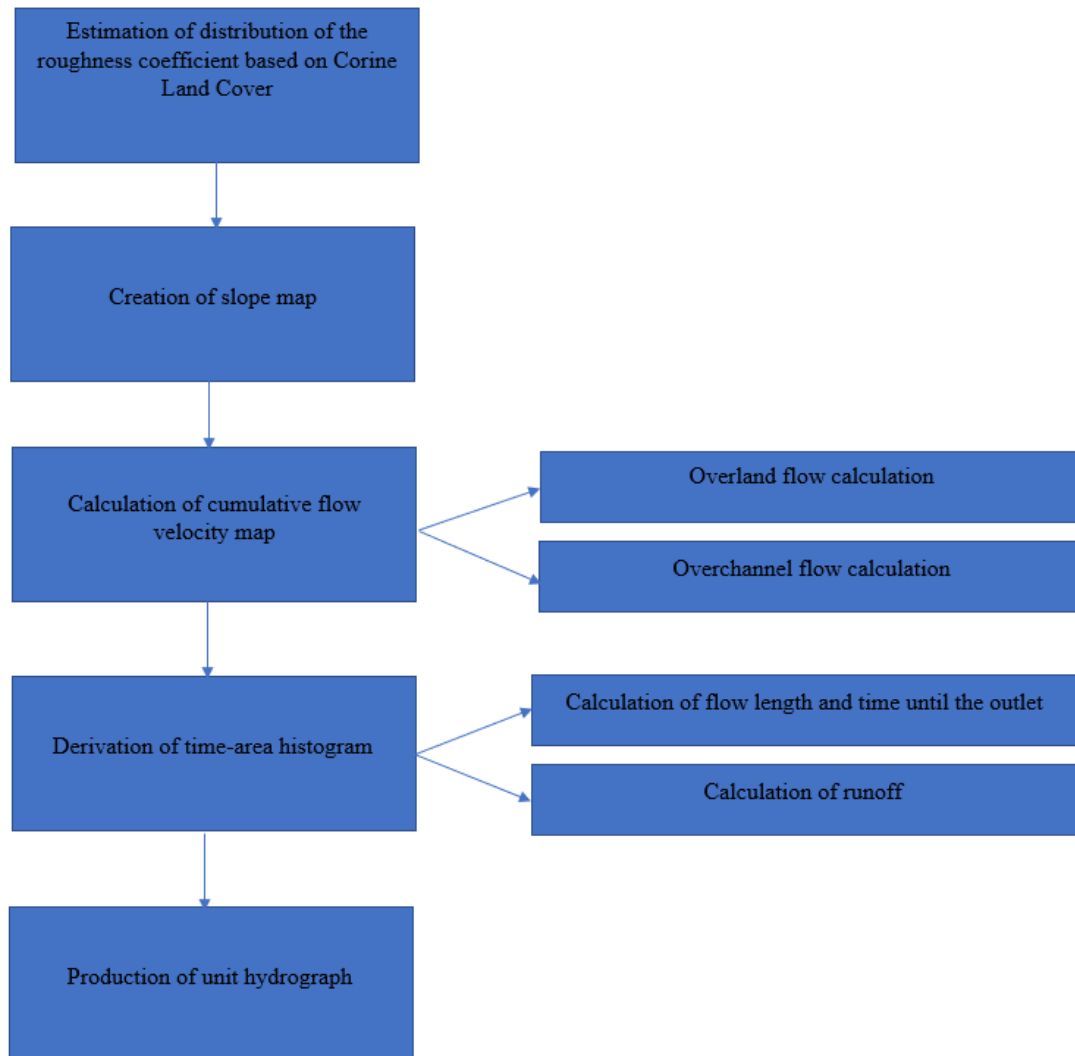


Figure 2: Flow chart of time-area method

Rainfall data are needed to estimate the discharge at the outlet of the basin and create a flood hydrograph. In order to do that, the intensity-duration-frequency (IDF) curves are used with a return period of 100 years and duration of precipitation of 12 hours. The applied precipitation distribution is calculated using alternative blocks method. The result of this method is the histogram that is presented below in Figure 3:

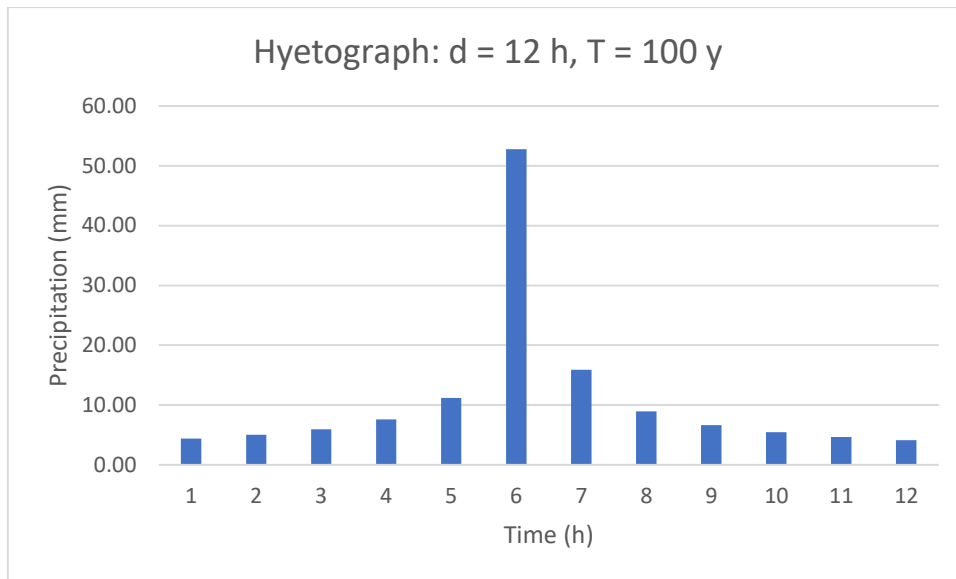


Figure 3: Hyetograph based on alternating block method

The second method of calculating precipitation distribution is worst profile method. The method of worst profile is a variant of the alternating block method with the exception that the highest rainfall height is positioned across the highest ordinate of the unit hydrograph, the immediately smaller rainfall height across the immediately smaller ordinate, etc (Koutsoyiannis, 2010). The worst profile method is done for comparison purposes with alternating block method and only for User Specified Unit hydrograph transform method. The result of this method is the histogram that is presented below in Figure 4:

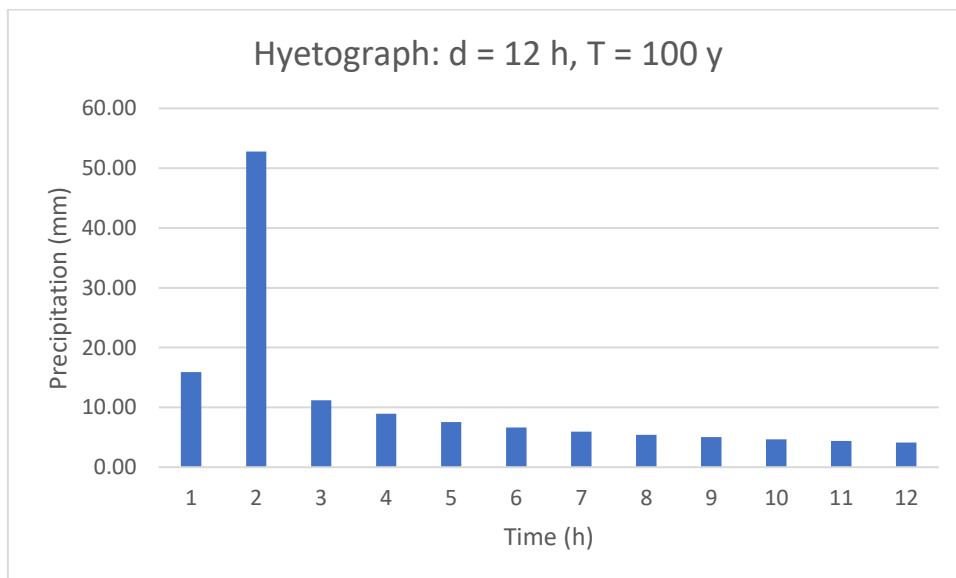


Figure 4: Hyetograph based on worst profile method

The other method to Snyder Synthetic Unit Hydrograph was executed with the use of the HEC-HMS software. HEC-HMS is globally known and used software designed by

the U.S Army Corps of Engineers. It is developed to solve a range of applications such as rainfall episodes, watering system study and sediment transport analysis.

In particular, applying Snyder Synthetic Unit Hydrograph is essential to estimate the maximum watercourse length of the basin until its outlet (L) as well as the distance from the study area output as the closest spot along the watercourse in the center of gravity of the basin (Lca). Cp coefficient depends on the units and characteristics of the basin. Ct coefficient depends on the topographic and soil characteristics of the basin. Their values range from 0.56-0.69 and from 1.80-2.20 respectively and they are dimensionless. Therefore, the necessary entry data to HEC-HMS is the lag time and the Cp coefficient. For the calculation of lag time, the following Equation 1 was used:

$$tp = 0.75 * Ct * (Lca * L)^{0.3} \quad (1)$$

Lca (km), L (km) , tp (h)

In order to calculate hydrological losses, the SCS CN Method was used. This method was developed by the USDA Natural Resources Conservation Service. In particular, it is an empirical method that calculated the height and consequently the volume surplus of raining base of three variables: the height of rain, initial deficits and combination of land use and geological characteristics of the ground. The CN is a dimensionless number with a range of 0 to 100. Small values indicate permeable soil, while large impermeable. The CN raster map, for (AMC II) can be displayed in the Figure 5 below:

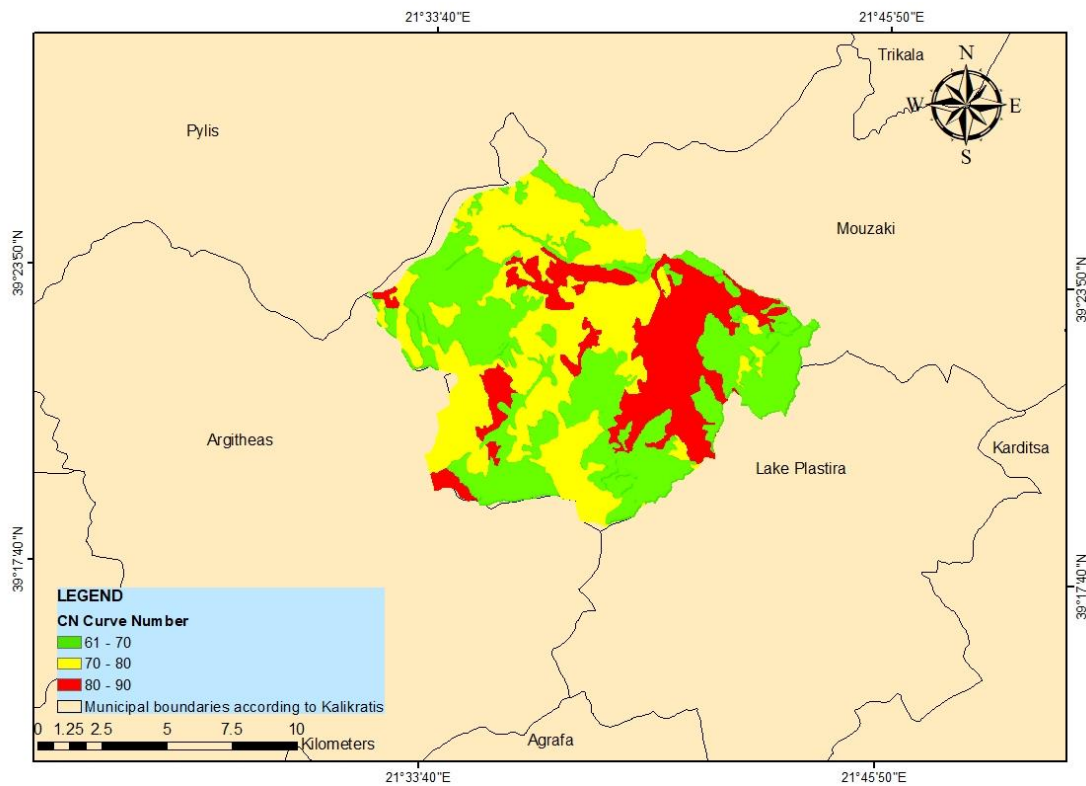


Figure 5: CN map

Hydraulic Analysis

Hydraulic analysis was conducted downstream of the study area in Mouzaki through HEC-RAS. HEC-RAS is a free software, which was created by the (U.S Army Corps of Engineers-U.S.A.C.E). Its main purpose is to make calculations for steady and unsteady flow conditions. Also, it is possible to simulate the water level as well as the transfer and deposition of sediment. HEC-RAS provides the ability to simulate the hydraulic analysis of rivers in one-dimensional condition (1D), in two-dimensional (2D), as well as in combination of two (1D/2D). Specifically, in Mouzaki a 2D hydrodynamic unsteady flow analysis is accomplished though HEC-RAS 5.0.7. Regarding unsteady flow analysis computations, Saint-Venant equations numerical solution is approximated using an implicit finite difference approach through the computational Box Scheme (U.S Army Corps of Engineers, 2016).

The data needed to apply the HEC-RAS Hydraulic Simulation and provided by the ArcGIS software are: the terrain, the stream network, the stream network downstream of the subbasin, the land use, the subbasin viz the study area and the output point in the outlet of the subbasin. The terrain is raster data, and all other data are vectors. The terrain was defined by the DEM of 5 x 5 m pixel size resolution and the land use layer was found on the Corine Land Cover (2018) shapefile in order to calculate Manning's roughness coefficient. As an inlet boundary condition, the flow hydrograph is imported, calculated using two different methods: User Specified Hydrograph through time area method and Snyder Synthetic Unit Hydrograph for comparison purposes. The flow hydrograph was calculated through HEC-HMS software. As an outlet boundary condition, the normal depth was imported with value equal to 0.01. Finally, maps for the maximum velocity and maximum depth are produced as a result of the floodplain area.

Results and discussion

Hydrological analysis

First of all, the unit hydrograph of the study area is created. It is produced through the User Specified Unit hydrograph through time area method as already mentioned before. The unit hydrograph is presented in the Figure 6 below.

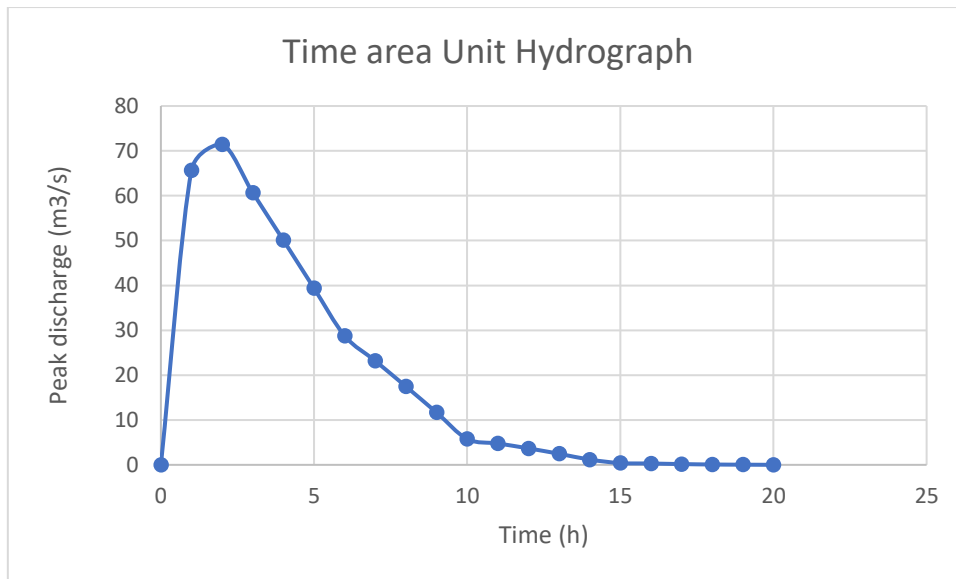


Figure 6: Unit hydrograph of the basin through time area method

According to the unit hydrograph the maximum peak discharge is calculated $71.47 \text{ m}^3/\text{s}$. Its peak time corresponds to 2 h and its base time of 20 h. It is worth noting that the shape of unit hydrograph depends on: the physical characteristics of the catchment area and the characteristics of precipitation.

At this point it is worth presenting the results of the floods hydrograph by alternating block method and worst profile method using User Specified Unit hydrograph method. The results of two methods are presented in the following Figure 7:

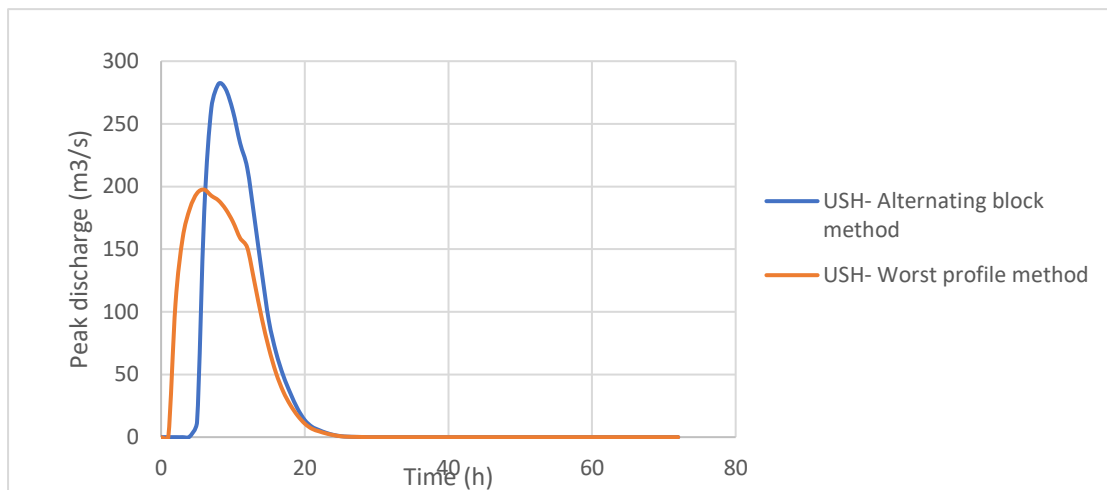


Figure 7: Floods hydrograph by the USH using alternating block method and worst profile method

Based on the results of the above floods hydrograph, the alternating block method shows a peak discharge of $282 \text{ m}^3/\text{s}$ and peak time at 8 h. As far as worst profile method it shows peak discharge of $197.5 \text{ m}^3/\text{s}$ and peak time at 6 h. This happens because the worst profile method shows rain losses earlier than the alternating block method. It is worth noting that the method of the worst profile is more adverse due to

the peak time of its flooding which is sooner than the peak time of alternating block method.

Then the synthetic unit hydrograph was applied. It is reminded that synthetic unit hydrographs are applied to areas where no measurements are. According to the Table 1 below, the peak discharge of the Synthetic's Unit Hydrograph is $52.79 \text{ m}^3/\text{s}$.

Table 1: Parameters of the Snyder Synthetic Unit Hydrograph.

Snyder Synthetic Unit Hydrograph UH	Simulation position
Area (km^2)	139.40
L (km)	16.91
Lca (km)	4.07
Ct	1.85
Cp	0.68
tp (h)	4.94
Qp (m^3/s)	52.79

After calculating the unit hydrographs, the 12-hour design precipitation and 100 years of recovering period was calculated using the alternating block method. The rain curve Drakotrypa was chosen, the only one inside the study area. Then the hietograph of alternating block method and the unit hydrographs of User Specified Unit hydrograph through time area method and Snyder Synthetic Unit Hydrograph method are imported to HEC-HMS. In this way the floods hydrograph of the two methods are calculated as shown in Figure 8.

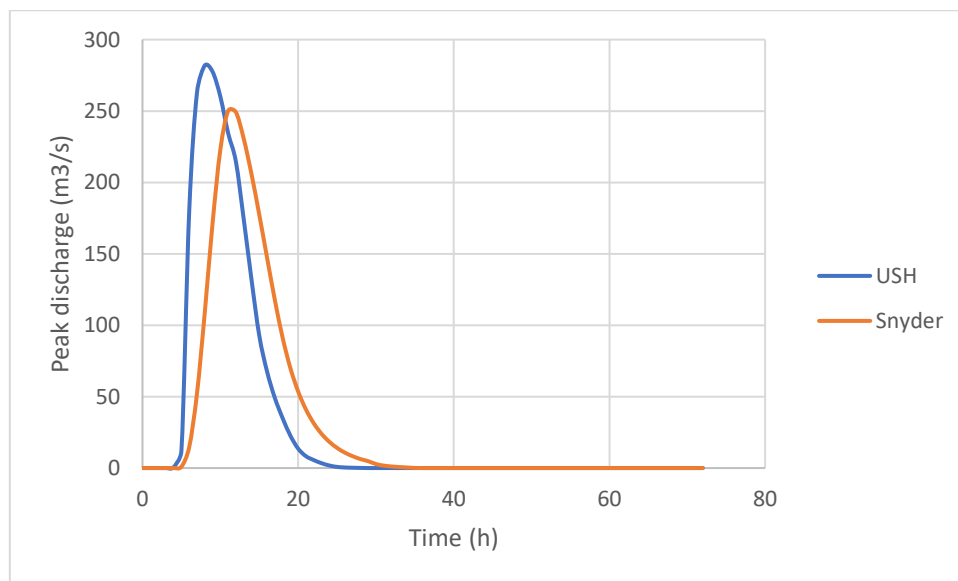


Figure 8: Flood hydrograph by the USH and Snyder Synthetic Unit Hydrograph method at the point of simulation of the basin

According to the above flood hydrographs, the User Specified Unit hydrograph through time area method shows a peak of $281.9 \text{ m}^3/\text{s}$ and a peak time of 8 h. As far as the Snyder Synthetic Unit Hydrograph is concerned, it shows a peak of $250.1 \text{ m}^3/\text{s}$ and a peak time of 11 h. Based on the results, the UH method shows greater peak discharge and sooner than the Snyder Synthetic Unit Hydrograph method. It is worth noting that the UH method requires a large amount of data and needs more time to calculate the unit hydrograph, but it calculates it in more detail and allows researcher to adjust its variables to achieve the optimal results that are needed (Theochari, Develekou and Baltas 2021).

Hydraulic analysis

The floodplain of the stream network is simulated through HEC-RAS software for 2D dimensions and unsteady flow analysis. The flood hydrographs as presented above are imported to the software as an upper boundary condition. The results of hydraulic analysis are the maximum depth and maximum velocity of the floodplain in the study area.

The hydraulic analysis concerns the area of Mouzaki of 13122 inhabitants according to the 2011 census of Hellenic statistical authority. In terms of land uses in the area of Mouzaki it prevails discontinuous urban fabric and non-irrigated arable land.

The results of hydraulic analysis depend to a significant degree on the quality on the input data. Initially, the analysis of the DEM plays an important role as a rough DEM cannot accurately capture in detail the geometry of the waterway and likely is going to lead to incorrect conclusions. Also, the manning coefficient that represents the roughness or friction applied to the flow by the channel greatly affects the results of hydraulic analysis. In the literature there are various references to these values but there are present significant fluctuations.

Based on the results of the time area method for the maximum depth map there is an average value of 0.84 m and reaches in some areas 2.34 m. For maximum velocity map, the average velocity is estimated 3.32 m/s and in some areas, it reaches 6.84 m/s. The maximum depth map through the Snyder Synthetic Unit Hydrograph calculates a mean value of depth at 0.79 m and reaches up to 2.25 m in some positions. The maximum velocity map through the Snyder Synthetic Unit Hydrograph method estimates an average value of 3.17 m/s and in some positions, it is 6.53 m/s. From the execution of the above methodology, it is found that with both transform methods flooding areas with sclerophyllous vegetation as land use have values of depth ranging 1.2-1.6 m and velocity values ranging 4-5 m/s. In addition, flooding areas of non-irrigated arable land have values of depth that exceed 1.6 m in some areas and velocity values ranging 5-6 m/s and for areas with discontinuous urban fabric depths are ranging between 0.8-1.2 m and velocity values ranging 3-4 m/s. The maximum depth map and maximum velocity map of the two methods are as follows in Figures 9,10,11 and 12:



Figure 9: Maximum depth map by time area method



Figure 10: Maximum velocity map by time area method



Figure 11: Maximum depth map by Snyder Synthetic Unit Hydrograph method



Figure 12: Maximum velocity map by Snyder Synthetic Unit Hydrograph method

Sensitivity Analysis

The sensitivity analysis was applied on the CN coefficient of Snyder Synthetic Unit Hydrograph method, using the one at a time method (OAT). Specifically, one variable is changed and the others are keeping constant and then return the value to its initial value and repeating the same procession for the other values in the same way.

Parameter CN

The sensitivity analysis was performed on the CN for the following changes in parameter by: 2%, 4% and 6% according to the initial value. The percent change as well as the change of maximum discharge according to User Specified Unit hydrograph through time area and Snyder Synthetic Unit Hydrograph method are listed below in Tables 2 and 3 and Figure 13:

Table 2: Basic characteristics for CN sensitivity analysis according to User Specified Unit hydrograph through time area method

	Qmax (m3/s)	tQmax (h)	ΔQ (%)
CN -6%	238.2	8	-15.50
CN -4%	248.9	8	-11.71
CN -2%	270.8	8	-3.94
CN	281.9	8	0.00
CN +2%	293.2	8	+4.01
CN +4%	316.3	8	+12.20
CN +6%	328.1	8	+16.39

Table 3: Basic characteristics for CN sensitivity analysis according Snyder Synthetic Unit Hydrograph method

	Qmax (m3/s)	tQmax (h)	ΔQ (%)
CN - 6%	214.1	12	-14.39
CN -4%	222.8	12	-10.92
CN -2%	240.4	11	-3.88
CN	250.1	11	0.00
CN +2%	259.9	11	+3.92
CN+4%	279.9	11	+11.92
CN+6%	290.1	11	+15.99

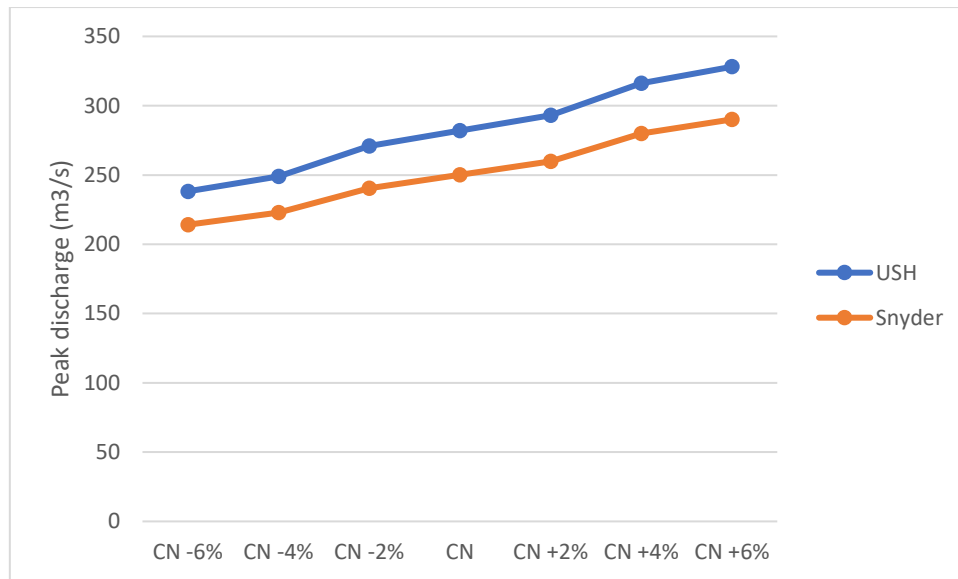


Figure 13: Peak discharge for sensitivity analysis CN

As shown, an increase in the CN parameter is equivalent to increasing peak discharge and a decrease in the loss volume. Also, any change in the parameter results a noticeable differentiation of peak flow. For User Specified Unit hydrograph through time area method the peak time remained stable at 8 h while with the Snyder Synthetic Unit Hydrograph method peak time is 11 h except the percentage of -4% and -6% that is 12 h.

Conclusions

By applying the above methodology in the study area, the following conclusions are exported:

- The correctness of the results based on the above methodology is correlated with the amount but also the accuracy of available data as well as by setting up some parameters.
- Land usage is very important for the exported results. It is parameter of both hydrological losses and Manning coefficient at the hydraulic resolution stage.
- The worst profile method shows less peak discharge and peak time than the alternating block method because rain losses appear faster. The worst profile method is more adverse due to the peak time of its flooding which is sooner than the peak time of alternating block method.
- The results of hydraulic analysis depend to a significant extent on the quality of the input data. Initially, the analysis of the DEM plays a vital role as a DEM with not good quality cannot accurately capture the geometry characteristics of the watercourse and is likely to drive in incorrect conclusions. As mentioned above, the Manning coefficient greatly affects the effects of hydraulic analysis. In the literature there are many reports

for those values, however, show significant fluctuations. Depending on his experience, the scholar will choose the one source who considers most suitable for his study.

- The User Specified Unit hydrograph through time area method is more detailed than Snyder Synthetic Unit Hydrograph method for exporting unit hydrograph as it introduces more accurate characteristics of the catchment basin. Also, the Snyder Synthetic Unit Hydrograph method is considered to underestimate the flood flow and presents a delay in relation to the results of the User Specified Unit Hydrograph method for this study.
- The flow depths in some parts of the river exceed 3 m and the flow velocities exceed 6 m/s with both methods. Big values of flow depth and flow velocity are observed at the points of the river near the settlement of Mouzaki.
- A crucial parameter is considered to be the hydrological losses through the SCS- CN method. According to the sensitivity analysis of the parameter, even a slight change in the value effects time peak especially in Snyder Synthetic Unit Hydrograph method and peak discharge in both methods.
- With regard the peak discharges for sensitivity analysis of the CN parameter the relationship between them for the various changes of the parameter is considered relatively satisfactory.

Even though the results presented in this thesis are satisfactory, this approach has much potential for further improvement and research:

- Application of the distributed model as well as semi-distributed model for study area and comparing the results with the lumped model that has being used in this thesis. With the application of distributed and semi-distributed model, more accurate results are expected as they take into consideration more characteristics of study area but would also have interest to observe their weaknesses.
- Calibration of certain parameters is very important in order to measure uncertainty of this study. Then, via validation can be observed whether the values are representative and to improve the accuracy of the selected values in relation to the original.
- The choice of specific historical raining events in order to have better assess of the results and comparing them with existing flood maps.
- The use of different software from HEC-HMS for the hydrological analysis of the study area and comparison of their results.
- Using the HEC-RAS software, the sediment's transport calculation that contributes of the total rainfall and is due to an increase in peak discharge.

Selected References

EC (2007) Directive on the assessment and management of flood risks (2007/60/EC), Official J, L288, The European Parliament and the Council of the European Union, Brussels.

Koutsoyiannis D. (2010), Hydrological study of severe rainfall in the Kephisos basin , Greece. Athens.

Osti, R. (2004), “Community participation and agencies role for the implication of water induced disaster management, protecting and enhancing the poor”, Disaster Prevention and Management, Vol. 13 No. 1, pp. 6-12.

Singh, V., P., 1992. Elementary Hydrology, Prentice Hall. New Jersey

Theochari, A. P., Develekou, M., & Baltas, E., 2021, GIS-Based Multi-criteria Approach Towards Sustainability of Flood-Susceptible Areas in Giofiros River Basin, Greece. Circular Economy and Sustainability, 1-12.

U.S. Army Corps of Engineers (2016) River Analysis System HEC-RAS. User’s Manual, Version 5.0., U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, USA.

WWAP (2006), UN World Water Development Report, World Water Assessment Programme-WWAP, Paris.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στην υπολεκάνη ανάντη του οικισμού Μουζάκι στο νομό Καρδίτσας. Αρχικά, υλοποιήθηκε η γεωμορφολογική ανάλυση της περιοχής μέσω του προγράμματος ArcGIS και της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. Έπειτα, ακολούθησε η υδρολογική ανάλυση της υπολεκάνης μέσω του λογισμικού HEC-HMS αξιοποιώντας δυο διαφορετικές μεθόδους μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή: τη μέθοδο Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από το Χρήστη, το οποίο υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών στο λογισμικό ArcGIS, και τη μέθοδο του Μοναδιαίου Συνθετικού Υδρογραφήματος κατά Snyder. Έγινε θεώρηση συγκεντρωτικού μοντέλου λεκάνης απορροής δηλαδή η περιοχή μελέτης αντιμετωπίστηκε ως μια ενιαία οντότητα. Τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών ήταν η παραγωγή πλημμυρογραφήματος για κάθε μια μέθοδο. Η εκτίμηση των απωλειών βροχής πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου SCS CN με την κατανομή της βροχόπτωσης να υλοποιείται μέσω της μεθόδου των εναλλασόμενων μπλοκ. Επίσης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου των εναλλασόμενων μπλοκ καθώς και της δυσμενέστερης διάταξης μέσω της μεθόδου του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη. Στη συνέχεια, με το πρόγραμμα HEC-RAS υλοποιήθηκε η υδραυλική προσομοίωση κατάντη της υπολεκάνης όπου βρίσκεται ο οικισμός του Μουζακίου. Αποτέλεσμα της υδραυλικής προσομοίωσης ήταν ο υπολογισμός του βάθους ροής καθώς και της ταχύτητας του πλημμυρικού πεδίου. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας με τη μέθοδο «Once at a time» για την παράμετρο CN ώστε να εξεταστεί αν η μεταβολή της επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα.

Όσον αφορά στην περιοχή μελέτης εντοπίζεται στην Περιφερειακή Ενότητα της Θεσσαλίας 28 km δυτικά του δήμου Καρδίτσας και έχει έκταση 139 km². Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή του Μουζακίου όπου βρίσκεται κατάντη της υπολεκάνης που εξετάζεται και στην έξοδο της οποίας λαμβάνει μέρος η υδραυλική προσομοίωση της παρούσας εργασίας. Επιλέχθηκε η περιοχή του Μουζακίου για υδραυλική μελέτη καθώς αποτελεί περιοχή η οποία είναι ευάλωτη σε πλημμυρικά φαινόμενα.

Για την υλοποίηση αυτής της εργασίας, απαραίτητα δεδομένα σε όλα τα στάδια υπολογισμών ήταν το ΨΜΕ μέσω του ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ Α.Ε καθώς και οι χρήσεις γης της περιοχής μέσω Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus Land Monitoring Service.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα παρακάτω κεφάλαια:

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή του υδρολογικού κύκλου του νερού και παρουσιάζεται το φαινόμενο των πλημμυρών. Γίνεται αναφορά στις κατηγορίες και τα αίτια των πλημμυρών καθώς και σε τρόπους αντιμετώπισής τους. Επίσης, γίνεται αναφορά στο θεσμικό πλαίσιο που αφορά τα πλημμυρικά φαινόμενα σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας και στο τέλος διατυπώνεται το αντικείμενο καθώς και η διάρθρωση της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης. Αρχικά, περιγράφονται τα φυσικά χαρακτηριστικά της όπως η γεωμορφολογία, η γεωλογία, το κλίμα της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλίας καθώς και τα υδατικά χαρακτηριστικά της περιοχής, ενώ έπειτα διακρίνονται κάποια ανθρωπογενή χαρακτηριστικά όπως ο πληθυσμός, η οικονομία, καθώς και οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης. Τέλος, παρουσιάζονται ιστορικά γεγονότα πλημμυρών που έπληξαν τη συγκεκριμένη περιοχή.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αρχικά, παρουσιάζεται η γεωμορφολογική ανάλυση της ευρύτερης περιοχής μελέτης σε περιβάλλον ArcGIS και HEC-GeoHMS για την εξαγωγή στοιχείων απαραίτητων για τη συνέχεια της μεθοδολογίας. Το επόμενο στάδιο αφορά την υδρολογική ανάλυση της υπολεκάνης που εξετάζεται, η οποία πραγματοποιήθηκε με χρήση των λογισμικών ArcGIS και HEC-HMS εφαρμόζοντας διαφορετικές μεθόδους μετασχηματισμού βροχής σε απορροή, προκειμένου να παραχθούν τα πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της υπολεκάνης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η βροχή σχεδιασμού υπολογίστηκε με βάση τις δεδομένες όμβριες καμπύλες της περιοχής μελέτης και εφαρμόζοντας τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Επίσης, γίνεται σύγκριση της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ καθώς και της δυσμενέστερης διάταξης μέσω της μεθόδου του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε υδραυλική προσομοίωση κατάντη της εξόδου της υπολεκάνης, όπου βρίσκεται ο οικισμός του Μουζακίου αξιοποιώντας το λογισμικό HEC-RAS με δεδομένα εισόδου τα παραπάνω πλημμυρογραφήματα, ώστε να υπολογιστούν οι χάρτες βάθους και ταχύτητας ροής του δισδιάστατου πλημμυρικού πεδίου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε. Αρχικά, για την υδρολογική ανάλυση παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα για κάθε μία μέθοδο που εφαρμόστηκε σύμφωνα με το λογισμικό HEC-HMS. Επίσης, γίνεται σύγκριση των πλημμυρογραφήματων της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ καθώς και της δυσμενέστερης διάταξης μέσω της μεθόδου του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη. Έπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης, δηλαδή οι χάρτες των πλημμυρικών πεδίων στους οποίους διακρίνονται τα μέγιστα βάθη ροής καθώς και οι μέγιστες ταχύτητες ροής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN, εφαρμόζοντας τη μέθοδο «Once at a time». Η ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN εφαρμόζεται και για τις δύο μεθόδους μετασχηματισμού βροχής σε απορροή. Παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα για κάθε μεταβολή της παράμετρου και για κάθε μέθοδο καθώς και η μεταβολή των παροχών αιχμής τους.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Επίσης, περιλαμβάνει προτάσεις για μελλοντική έρευνα σχετικά με τη μεθοδολογία και το αντικείμενο της εργασίας.

1.3 Γενικά

1.3.1 Υδρολογικός κύκλος

Υδρολογικός κύκλος ή αλλιώς «κύκλος νερού» είναι η ανακύκλωση του νερού στη γη (Inglezakis and Menegaki, 2016). Εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας το νερό εξατμίζεται από θάλασσες, λίμνες καθώς και από τα φύλλα των φυτών μέσω της διαδικασίας της διαπνοής. Ο κύκλος αυτός δεν έχει αρχή και τέλος, θεωρητικά όμως η αρχή θα μπορούσε να είναι στην ατμόσφαιρα όπου το νερό βρίσκεται υπό τη μορφή υδρατμών εξαιτίας της εξάτμισής του από θάλασσες, λίμνες, βλάστηση κ.α.. Το νερό κατακρημνίζεται στη γήινη επιφάνεια σε μορφή βροχής, χιονιού ή χαλαζιού, όπου ένα μέρος του εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα, ενώ συνήθως φθάνοντας στη γη είτε εισχωρεί στο έδαφος εμπλουτίζοντας υπόγειους υδροφορείς, είτε κινείται προς πιο χαμηλές περιοχές και καταλήγει σε θάλασσες, λίμνες ή ποτάμια (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012). Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το νερό μετατρέπεται σε όλες τις φάσεις: αέριο, υγρό και στερεό. Οι συγκεκριμένες διαδικασίες συμβαίνουν εδώ και εκατομμύρια χρόνια.

Πιο αναλυτικά οι κύριες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου είναι:

- **Επιφανειακή απορροή:** Δημιουργία ρεμάτων που καταλήγουν στη θάλασσα
- **Υπόγεια απορροή:** Οι κατακρημνίσεις του νερού οι οποίες εισχωρούν στο έδαφος.
- **Κατακρήμιση:** Το νερό στις διάφορες φάσεις του (βροχή, χιόνι , χαλάζι) από την ατμόσφαιρα καταλήγει στη γήινη και υδάτινη επιφάνεια.
- **Εξάτμιση:** Το νερό μεταφέρεται από τη θάλασσα και την στεριά στην ατμόσφαιρα μέσω υδρατμών.
- **Διήθηση:** Το νερό εισέρχεται στο έδαφος από την επιφάνειά του.

Ο υδρολογικός κύκλος του νερού οπτικοποιείται στο ακόλουθο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Ο υδρολογικός κύκλος (Πηγή: Inglezakis and Menegaki 2016)

1.3.2 Τι είναι πλημμύρα

Οι πλημμύρες αποτελούν έναν από τους πιο απειλητικούς φυσικούς κινδύνους που αντιμετωπίζουν οι ανθρώπινες κοινωνίες. Στην Ασιατική ήπειρο σε χώρες όπως η Ινδία, η Κίνα, οι Φιλιππίνες, το Ιράν, το Μπαγκλαντές και το Νεπάλ τα πλημμυρικά φαινόμενα είναι αρκετά έντονα και συχνά (WWAP, 2006). Στις χώρες αυτές όπως και στις υπόλοιπες αναπτυσσόμενες χώρες που πλήττονται από πλημμύρες οι επιπτώσεις από τις καταστροφές του φυσικού αυτού φαινομένου θα επιδεινώνονται από την στιγμή που η φτώχεια αποτελεί ένα συνεχές κυκλικό φαινόμενο (Osti, 2004). Καταστροφές και προβλήματα που αφορούν πλημμυρικά φαινόμενα επικρατούν βεβαίως και στις αναπτυγμένες χώρες ωστόσο κρίνεται επιτακτική η δημιουργία και συντήρηση αντιπλημμυρικών έργων και η λήψη νέων πιο αποτελεσματικών μέτρων προστασίας. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK ως πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη ενός τμήματος της γης από νερό το οποίο υπό κανονικές συνθήκες δεν θα καλυπτόταν. Ο ορισμός αυτός εμπεριέχει τις πλημμύρες που προέρχονται από ποταμούς, χείμαρρους καθώς και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές χωρίς να λαμβάνει υπόψη πλημμύρες που προέρχονται από τα συστήματα αποχέτευσης. Στην ίδια Οδηγία, ως κίνδυνο πλημμύρας ορίζεται η πιθανότητα εκδήλωσης πλημμύρας με ενδεχόμενες συνέπειες στην υγεία των ανθρώπων, στο περιβάλλον, στην οικονομική δραστηριότητα καθώς και στην πολιτιστική κληρονομιά. Για το λόγο αυτό, κρίνεται επιτακτική η περαιτέρω μελέτη αυτού του φυσικού φαινομένου καθώς και η λήψη όλο και περισσότερων μέτρων προστασίας.

1.3.3 Κατηγορίες πλημμυρών

Αν και στην πραγματική ζωή το φαινόμενο της πλημμύρας είναι κάτι πολύπλοκο, η Ευρωπαϊκή ένωση έχει κατατάξει τις πλημμύρες στις παρακάτω κατηγορίες (Γινόπουλος 2012):

- **Παράκτιες πλημμύρες:** Οι πλημμύρες αυτές οφείλονται στη μεγάλη ένταση του ανέμου ο οποίος προκαλεί μεγάλα κύματα. Σε ακόμα πιο δυσμενείς συνθήκες, δημιουργούνται τσουνάμι και παλίρροιες, τα οποία κατακλύζουν σημαντικό μέρος της στεριάς.
- **Ποτάμιες πλημμύρες:** Οι πλημμύρες αυτές σχηματίζονται κατά μήκος των ποταμών, συνήθως το χειμώνα όπου παρατηρείται το φαινόμενο λιώσιμο του χιονιού και γεμίζουν οι λεκάνες απορροής άμεσα με ποσότητες νερών.
- **Αστικές πλημμύρες:** Οι αστικές πλημμύρες οφείλονται στην αλλαγή της δασικής περιοχής σε αστική δηλαδή τη δημιουργία έργων όπως δρόμων, κτηρίων κ.α, με τα οποία περιορίζεται η απορροφητικότητα της βροχής.
- **Πλημμύρες Κατάκλισης:** Οι πλημμύρες κατάκλισης δημιουργούνται όταν συσσωρεύονται επιφανειακά ύδατα εξαιτίας έντονων βροχοπτώσεων τα οποία γεμίζουν το αποχετευτικό σύστημα με αποτέλεσμα η περίσσεια νερού να μην μπορεί να απορροφηθεί.
- **Αιφνίδιες πλημμύρες:** Οι αιφνίδιες πλημμύρες οφείλονται στη μεγάλη ένταση της βροχόπτωσης και στη μεγάλη διάρκειά της. Επίσης, εξαρτώνται από το ανάγλυφο και το έδαφος της εκάστοτε λεκάνης.

Σαν γενικές παρατηρήσεις, οι πιο καταστροφικές πλημμύρες είναι οι αιφνίδιες καθώς είναι απρόβλεπτες και πολλές φορές δεν υπάρχει επαρκής χρόνος για την έγκαιρη λήψη μέτρων. Παρόλα αυτά, οι αιφνίδιες πλημμύρες είναι σπανιότερες από τις αστικές όπου η αντιμετώπιση των τελευταίων είναι πιο διαχειρίσιμη.

1.3.4 Αίτια των πλημμυρών

Όπως επισημάνθηκε παραπάνω, η πλημμύρα είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Οι αιτίες δύναται να είναι είτε φυσικού περιεχομένου είτε τεχνητού.

Πιο συγκεκριμένα, φυσικό αίτιο πλημμυρών είναι μια καταιγίδα μεγάλης διάρκειας και έντασης κατά βάση τους χειμερινούς μήνες. Επιπρόσθετα, φυσικά αίτια πλημμυρών οφείλονται σε πυρκαγιές κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, εξαιτίας των οποίων μειώνεται η διήθηση του νερού λόγω έλλειψης βλάστησης. Τεχνητές αιτίες νοούνται οι αιτίες οι οποίες οφείλονται στην ανθρώπινη δραστηριότητα όπως η αλλαγή μιας δασικής περιοχής σε αστική με τη δημιουργία έργων όπως δρόμων, κτηρίων κ.α, με τα οποία περιορίζεται η απορροφητικότητα της βροχής. Επίσης, η παρέμβαση του ανθρώπου στα πλημμυρικά φαινόμενα όπως η ευθυγράμμιση της ροής των ποταμών, η εξάλειψη φυσικών πεδίων κατάκλισης, η δημιουργία αυθαίρετων κατασκευών στις

κοίτες ποταμών έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία απρόβλεπτων πλημμυρικών φαινομένων. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τον ιστότοπο της Ευρωπαϊκής Ένωσης σημαντική αιτία πλημμυρών είναι η έξαρση της κλιματικής αλλαγής εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας που έχει σαν αποτέλεσμα συχνότερες και εντονότερες βροχοπτώσεις. Η αποψίλωση των δασών αφενός έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της κατακράτησης των υδάτων από τη βλάστηση αφετέρου αποτελεί αίτιο της κλιματικής αλλαγής λόγω περίσσιου διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Ο πρόσφατα προτεινόμενος Ευρωπαϊκός κανονισμός για το κλίμα έχει ως σκοπό να επιτευχθεί μείωση κατά 60% στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έως το 2030 και μηδενικές καθαρές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως έως το 2050.

1.3.5 Αντιμετώπιση των πλημμυρών

Από την αρχαιότητα οι άνθρωποι έδειχναν ιδιαίτερη μέριμνα για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων των πλημμυρών. Μια σημαντική παράλειψη του παρελθόντος ήταν ότι οι άνθρωποι δεν έδιναν τόση έμφαση στα ανάντη και κατάντη του ποταμού αλλά μελετούσαν την πλημμύρα σε τοπικό επίπεδο. Στη σύγχρονη εποχή, πραγματοποιείται μια ολοκληρωμένη μελέτη των λεκανών απορροής με βάση τα πλημμυρικά φαινόμενα, σε συνεργασία με επιστήμονες από διάφορα πεδία με σκοπό την καλύτερη διαχείρισή τους. Για την αντιμετώπιση των πλημμυρών απαιτούνται ενέργειες οι οποίες είτε απαιτούν την κατασκευή έργων είτε τη διαχείριση της υφιστάμενης κατάστασης έναντι των πλημμυρών (Μπενέκου 2014).

Η κατασκευή έργων αντιπλημμυρικής προστασίας έχει ως αποτέλεσμα αφενός την ασφαλή εισροή των πλημμυρικών παροχών αφετέρου τη διαχείριση του νερού μέσω της αποθήκευσής του και της μεταφοράς του σε άλλες περιοχές.

Ενδεικτικά κάποια αντιπλημμυρικά έργα είναι: δίκτυα ομβρίων και αποχετεύσεων για τη διαχείριση μεγάλων όγκων νερού στις αστικές περιοχές, ταμιευτήρες που βρίσκονται ανάντη της λεκάνης για τη συγκέντρωση των υδάτων, τοίχοι και αναχώματα για την συγκράτηση του νερού. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα κατασκευαστικά έργα δεν είναι άτρωτα στα πλημμυρικά επεισόδια καθώς εξ αρχής η μελέτη τους γίνεται με κάποια μικρή πιθανότητα αστοχίας. Γι' αυτό όπως επίσης και για οικονομικούς λόγους είναι απαραίτητη η εφαρμογή διαχείρισης των πλημμυρών με μη κατασκευαστικά έργα.

Τα μη κατασκευαστικά έργα αφορούν μέτρα έναντι των πλημμυρών τα οποία έχουν ως στόχο τον περιορισμό των πλημμυρικών ροών, μηχανισμούς πρόγνωσης του πλημμυρικού κινδύνου, την ενημέρωση των πολιτών για την πλημμυρική επικινδυνότητα καθώς και τη συντήρηση υπαρχόντων υποδομών και την αποκατάσταση των ενδεχόμενων βλαβών από τα πλημμυρικά φαινόμενα.

Ενδεικτικά κάποια μέτρα διαχείρισης των πλημμυρών χωρίς την απαίτηση κατασκευής κάποιου έργου είναι: Η συντήρηση του δικτύου ομβρίων και αποχετεύσεων με ιδιαίτερη έμφαση σε περιοχές μεγάλης πλημμυρικής διακινδύνευσης, συστήματα πρόγνωσης καταγίδων με τα οποία θα υπάρχει άμεση προειδοποίηση σε περίπτωση δημιουργίας πλημμυρικού επεισοδίου, η διατήρηση και η αναδάσωση περιοχών κυρίως

σε περιοχές με μεγάλη πιθανότητα πλημμύρας, η διαρκής και άμεση ενημέρωση του κοινού σε περιπτώσεις πλημμυρικών φαινομένων.

Με βάση τα παραπάνω, κρίνεται απαραίτητη η συνέχιση της προσπάθειας των εμπλεκόμενων φορέων για τον περιορισμό των πλημμυρικών καταστροφών είτε με τη δημιουργία νέων έργων υποδομής είτε με μέτρα για τη διαχείριση και τον περιορισμό τους.

1.3.6 Οδηγία 2007/60/ΕΚ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αποφάσισε στις 23 Οκτωβρίου του 2007 να δημιουργήσει ένα πλαίσιο που αφορά την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας λαμβάνοντας υπόψη τους παροντικούς και μελλοντικούς κινδύνους εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής.

Βασικοί στόχοι του πλαισίου αυτού είναι ο περιορισμός των αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά καθώς και τις οικονομικές δραστηριότητες των ανθρώπων. Να σημειωθεί πως η οδηγία αυτή αποτελεί επέκταση της οδηγίας 2000/60/Εκ στο πλαίσιο για τα νερά.

Το πλαίσιο εφαρμόζεται σε τρία στάδια:

Το πρώτο στάδιο, το οποίο αναλύεται στο Κεφάλαιο II της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ, περιλαμβάνει μια προκαταρκτική αξιολόγηση που αφορά τους κινδύνους λόγω πλημμύρας για τις λεκάνες απορροής των ποταμών το οποίο ολοκληρώθηκε στα τέλη του 2011. Επίσης, αφορά δημιουργία χαρτών με εμφανή όρια, σε συγκεκριμένη κλίμακα, καθώς και παρουσίαση των τοπογραφικών χαρακτηριστικών των λεκανών όπως και των χρήσεων γης τους. Επιπλέον, επισημαίνονται οι περιοχές που είναι ευάλωτες στην πλημμύρα και αναμένεται για αυτές μεγαλύτερος κίνδυνος.

Το δεύτερο στάδιο το οποίο βρίσκεται στο Κεφάλαιο III του πλαισίου 2007/60/ΕΚ, αφορά χάρτες πλημμυρικού κινδύνου και χάρτες επικινδυνότητας σε συγκεκριμένη κλίμακα, λεκάνες οι οποίες έχουν χαμηλή, μέση και υψηλή πιθανότητα πλημμύρας. Για τα σενάρια αυτά, υπολογίζεται το εμβαδόν κατάκλισης της πλημμύρας, η στάθμη του νερού καθώς και η παροχή του. Στους χάρτες πλημμυρικής επικινδυνότητας παρουσιάζονται οι συνέπειες σε κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια, με ιδιαίτερη έμφαση στον αριθμό των κατοίκων που πιθανόν να πληγούν, στην οικονομική δραστηριότητα, καθώς και στα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκύπτουν. Σύμφωνα με το στάδιο αυτό, οι Ευρωπαϊκές χώρες ολοκλήρωσαν τη δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας και πλημμυρικού κινδύνου με προθεσμία τις 22 Δεκεμβρίου του 2013.

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο, όπου βρίσκεται στο Κεφάλαιο IV του πλαισίου 2007/60/ΕΚ, οι Ευρωπαϊκές χώρες ολοκλήρωσαν τη δημιουργία σχεδίων διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης με προθεσμία το 2015. Αυτά τα σχέδια αφορούν μέτρα που ελαχιστοποιούν την πιθανότητα πλημμύρας κατά το μέγιστο δυνατό καθώς και των επιπτώσεών της. Καλύπτουν όλο το φάσμα πλημμυρικής διακινδύνευσης με έμφαση στην:

- Πρόληψη: Πρόληψη της πολεοδομικής μελέτης νέων κατοικιών σε περιοχές που στην παρούσα φάση και μελλοντικά κινδυνεύουν από πλημμυρικά φαινόμενα όπως επίσης και οι μελλοντικές μελέτες οφείλουν να λαμβάνουν υπόψη την πλημμυρική διακινδύνευση.
- Προστασία: Την προστασία περιοχών με μεγάλη πιθανότητα πλημμύρας καθώς και την αποκατάσταση περιοχών που έχουν πληγεί από το φαινόμενο αυτό.
- Ετοιμότητα: Ενημερώνοντας τον κόσμο για τις απαραίτητες ενέργειες που οφείλει να κάνει σε πλημμυρικό φαινόμενο.

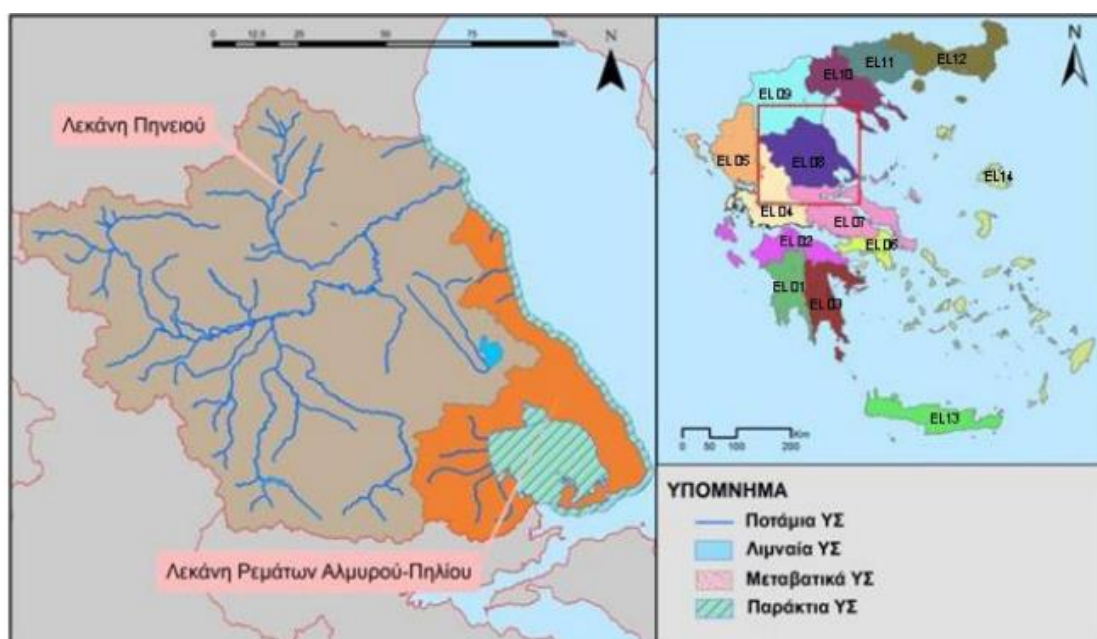
Τα τρία στάδια επαναλαμβάνονται ανά εξαετία, σεβόμενα ταυτόχρονα και το προηγούμενο πλαίσιο 2000/60/EK με αφετηρία το 2009. Σε περίπτωση διακρατικών περιοχών θα πρέπει να υπάρξει συντονισμός ανάμεσα στις εμπλεκόμενες χώρες ώστε να μοιράζονται από κοινού τα ζητήματα και να μην επιβαρύνει η μια την άλλη. Τέλος, θα πρέπει όλα τα κράτη μέλη να δείξουν ενδιαφέρον και συμμετοχή στα σχέδια πλημμυρικού κινδύνου, καθώς και να τα δημοσιοποιούν όταν κρίνεται απαραίτητο. Στην Οδηγία 2007/60/EK υπάρχουν προκαθορισμένες ημερομηνίες για κάθε μια διαδικασία.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Φυσικά χαρακτηριστικά

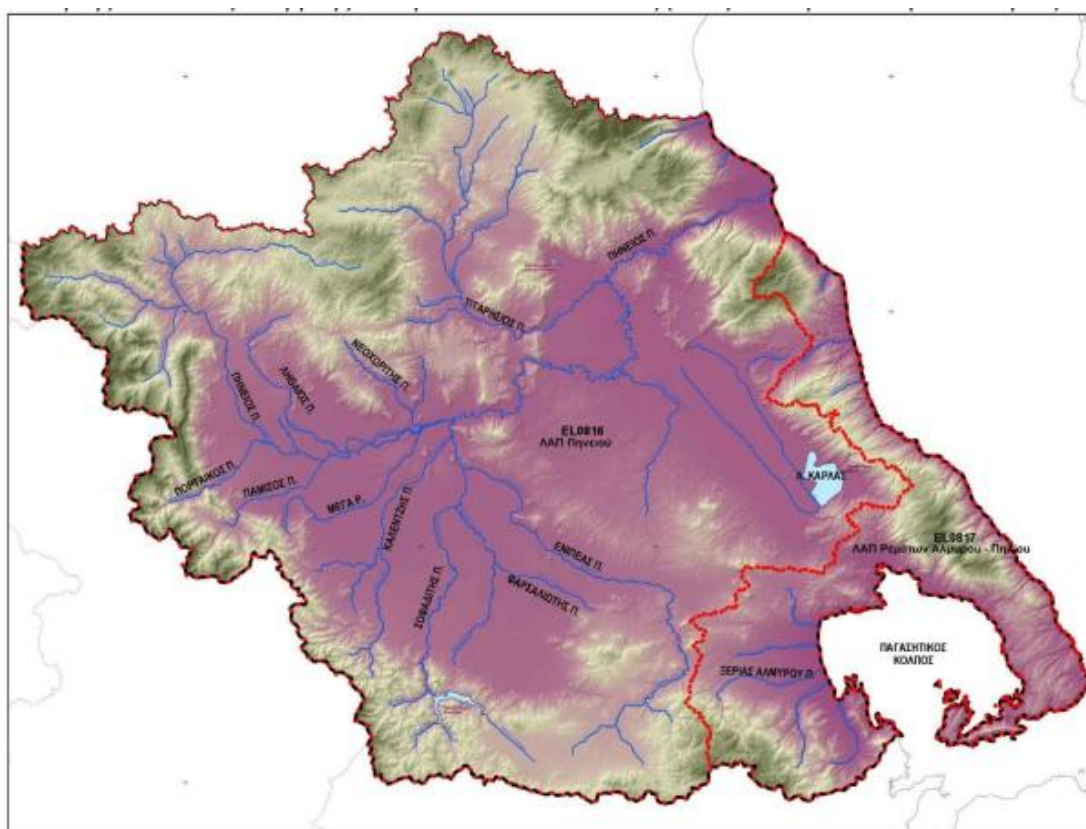
2.1.1 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή μελέτης ανήκει στο ευρύτερο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας με κωδικό ΥΔ 8 σύμφωνα με το υπουργείο περιβάλλοντος και την ειδική γραμματεία υδάτων. Συγκεκριμένα, το υδατικό αυτό διαμέρισμα περιλαμβάνει το κεντρικό και ανατολικό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας των Τρικάλων, το κεντρικό καθώς και το ανατολικό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Καρδίτσας, την Περιφερειακή Ενότητα Μαγνησίας και Σποράδων με εξαίρεση τα νησιά των Σποράδων, την Περιφερειακή Ενότητα της Λάρισας, ένα σχετικά μικρό τμήμα στα βόρεια της Περιφερειακής Ενότητας της Φθιώτιδας, ένα μικρό νότιο τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας της Πιερίας καθώς επίσης και ένα μικρό τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας των Γρεβενών. Η συνολική του έκταση εκτιμάται στα 13140 km^2 . Η έκταση αυτή σύμφωνα με το Σχήμα 2.1 χωρίζεται στη λεκάνη απορροής ποταμού Πηνειού 11062 km^2 και στη λεκάνη απορροής ρεμάτων Αλμυρού- Πηλίου 2078 km^2 (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας 2018).



Σχήμα 2.1: Λεκάνες και γεωγραφική θέση του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Πήγη: (1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας (EL 08) 2017))

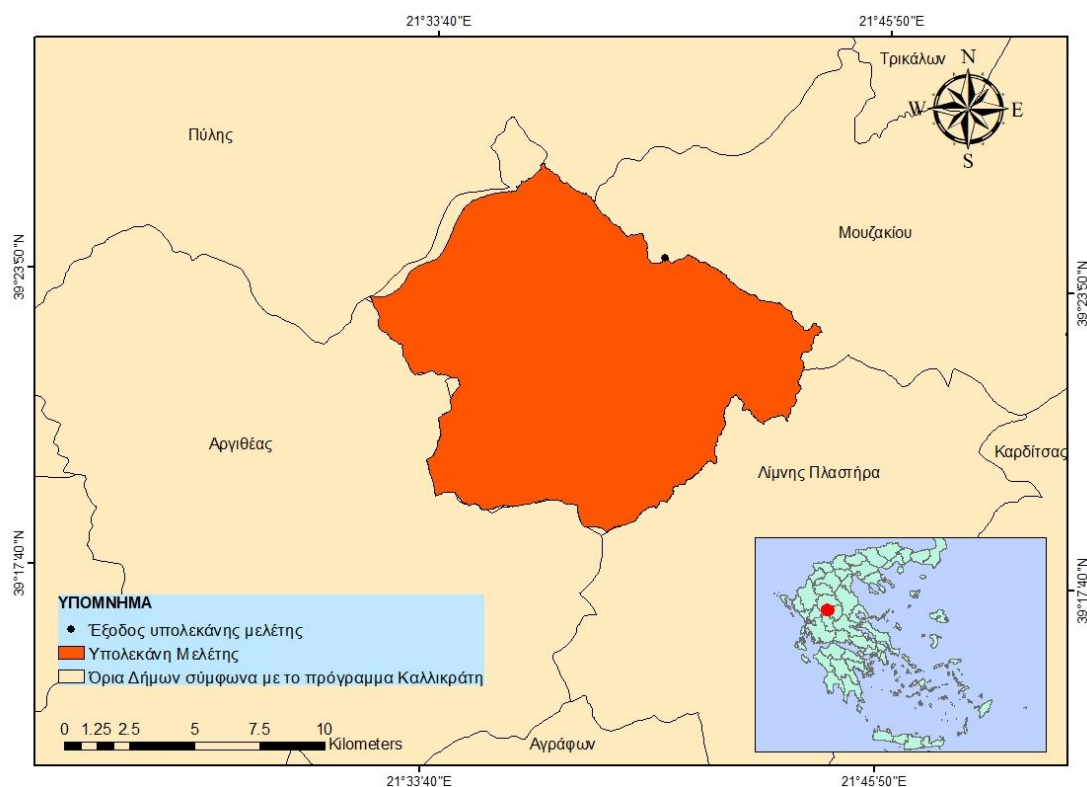
Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στη Ζώνη Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας (ΖΔΥΚΠ) «Ποταμός Πηνειός και Παραπόταμοι μαζί με την κλειστή λεκάνη της Λίμνης Κάρλας» με κωδικό GR08RAK0003. Έχει έκταση 3353 km² και ανήκει στην υδρολογική λεκάνη του Πηνειού όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι σημαντικότεροι παραπόταμοι του Πηνειού σύμφωνα και με το Σχήμα 2.2 οι οποίοι βρίσκονται εντός της ΖΔΥΚΠ είναι στα νότια ο Ενιπέας (132 km), ο Φαρσαλιώτης (38 km), ο Σοφαδίτης (56 km) και ο Καλέντζης (58 km), προς τα δυτικά-νοτιοδυτικά ο Πάμισος (25 km) και ο Πορταϊκός (24 km), στα ανατολικά το ρέμα Κουσμπασανιώτικο (34 km) και στο βόρειο μέρος ο Ληθαίος (63 km), ο Νεοχωρίτης (27 km) και ο Τιταρήσιος (96 km), ενώ υπάρχουν και άλλα μικρότερα υδατορεύματα (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας 2018). Η περιοχή μελέτης διασχίζεται από τον Πάμισο ποταμό.



Σχήμα 2.2: Λεκάνη απορροής ΥΔ Θεσσαλίας και κύριοι ποταμοί και λίμνες (Πηγή: (1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας (EL 08) 2017))

Όσον αφορά στην υπολεκάνη απορροής όπου πραγματοποιείται μελέτη ανάντη του οικισμού Μουζακίου εντάσσεται στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας όπου περιλαμβάνει την Περιφέρεια Θεσσαλίας η οποία διαιρείται σε πέντε Περιφερειακές Ενότητες: την Καρδίτσα, τη Λάρισα, τη Μαγνησία, τις Σποράδες και τα Τρίκαλα. Η περιοχή μελέτης εντάσσεται στην Περιφερειακή Ενότητα της Καρδίτσας στην οποία υπάγονται έξι Δήμοι: Αργιθέας, Καρδίτσας, Λίμνης Πλαστήρα, Μουζακίου, Παλαμά

και Σοφάδων. Μεγάλο τμήμα της περιοχής μελέτης ανήκει στο Δήμο Μουζακίου, ενώ ένα μικρό τμήμα της εντάσσεται στους Δήμους Αργιθέας και Λίμνης Πλαστήρα. Επίσης, η περιοχή μελέτης συνορεύει με τον Δήμο Πύλης στο βορειοδυτικό κομμάτι της. Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται 28 km δυτικά του Δήμου Καρδίτσας. Έχει έκταση 139 km² και η περιμέτρος της αντιστοιχεί σε 60 km. Στο Σχήμα 2.3 διακρίνεται το οριο της. Από υδρολογική σκοπιά η περιοχή εντάσσεται στις λεκάνες απορροής του Πηνειού (GR16) σύμφωνα με την απόφαση (ΦΕΚ 1383/Β'/02.09.2010) της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων.

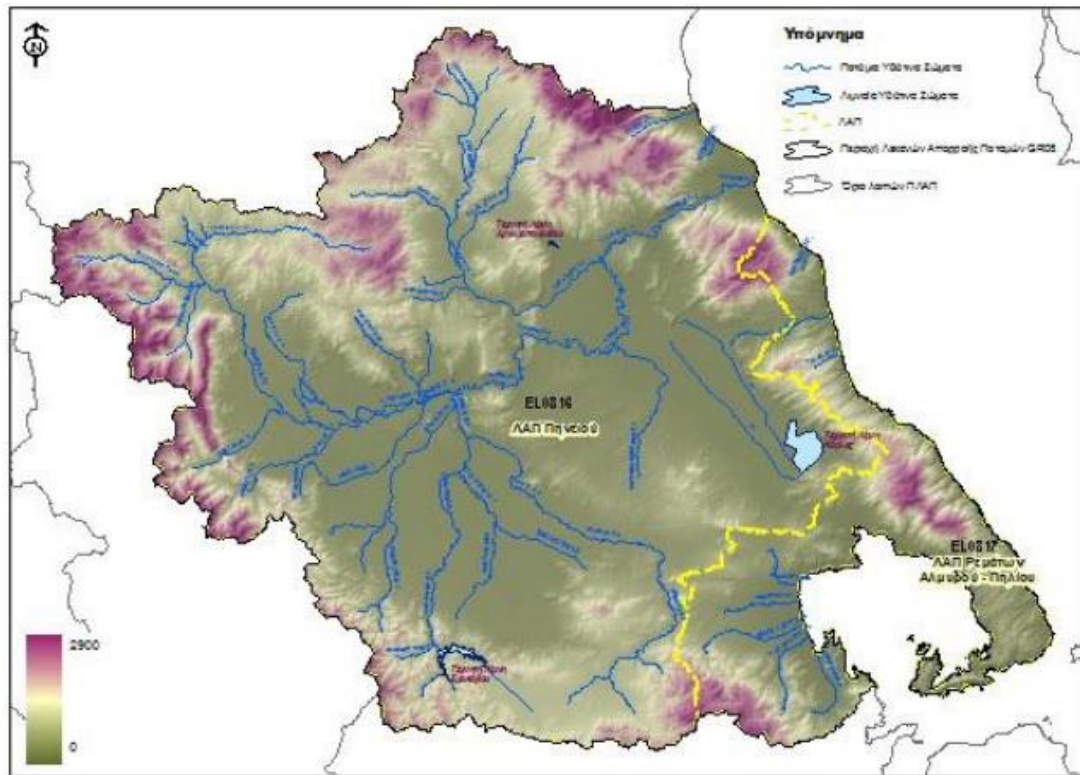


Σχήμα 2.3: Όριο υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

2.1.2 Γεωμορφολικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή της Θεσσαλίας χαρακτηρίζεται από απλά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, όπου οι ορεινές περιοχές της βρίσκονται περιμετρικά της περιοχής, ενώ οι πεδινές της σε κεντρικές. Συγκεκριμένα, η πεδινή περιοχή αντιστοιχεί στο 35% της Θεσσαλίας, η ορεινή-ημιορεινή αντιστοιχεί στο 26% της Θεσσαλίας και με υψόμετρο μεγαλύτερο των 600 m και τέλος οι λοφώδεις περιοχές που αντιστοιχούν στο 29% της Θεσσαλίας με υψόμετρα που κυμαίνονται από 150-600 m. Υπάρχουν πέντε βασικές ορεινές περιοχές, με πιο αξιοσημείωτη τον Όλυμπο το μεγαλύτερο βουνό της Ελλάδας με υψόμετρο 2917 m, πολύ μεγαλύτερο από το μέσο υψόμετρο της περιοχής που αντιστοιχεί στα 285 m. Επίσης, αποτελείται από το πεδινό τμήμα σε ανατολική και δυτική περιοχή από τα χαμηλά Χαλκηδόνια Όρη (Εθνικό πρόγραμμα Διαχείρισης και προστασίας των Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ 2008). Γενικότερα, η πεδιάδα της Θεσσαλίας αποτελεί τη μεγαλύτερη πεδιάδα της Ελλάδας. Η ακτογραμμή της μπορεί να

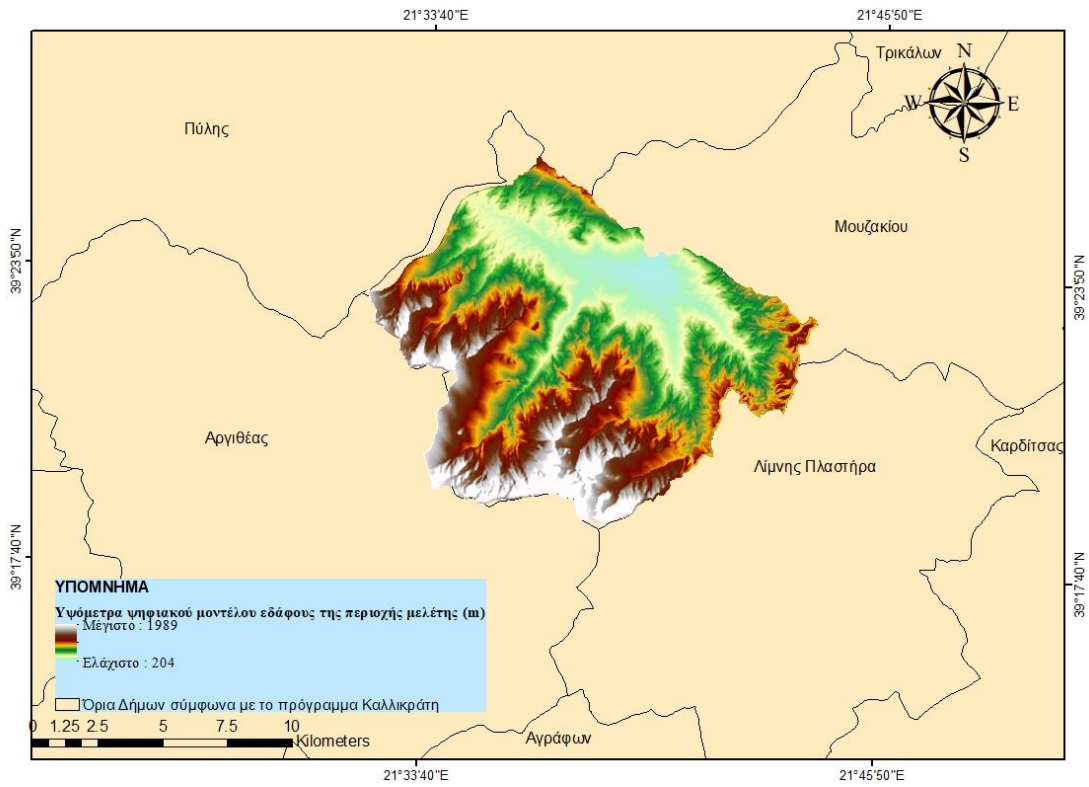
χαρακτηριστεί ως ήπια με εξαίρεση τον Παγασητικό Κόλπο. Ο μεγαλύτερος ποταμός της Θεσσαλίας είναι ο Πηνειός και αποτελεί τον τρίτο μεγαλύτερο σε μέγεθος στην Ελλάδα. Ο γεωμορφολογικός χάρτης της Θεσσαλίας είναι ο ακόλουθος σύμφωνα με το Σχήμα 2.4.



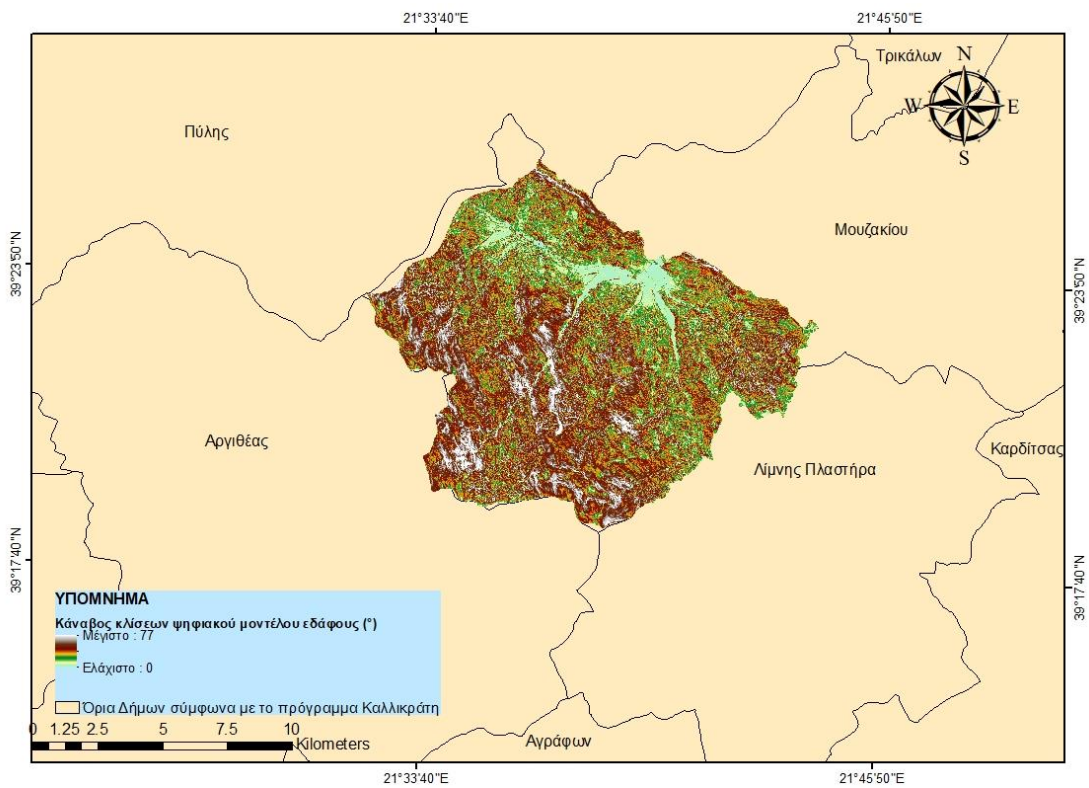
Σχήμα 2.4: Μορφολογικός χάρτης Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (Πηγή: (1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας (EL 08) 2017))

Όσον αφορά τα υψόμετρα της περιοχής μελέτης σύμφωνα με το ΨΜΕ ανάλυσης 5 m x 5 m του Σχήματος 2.5 προκύπτει μέγιστο υψόμετρο 1989 m, ελάχιστο υψόμετρο 204 m και το μέσο υψόμετρο προκύπτει 819 m.

Οι κλίσεις της λεκάνης απορροής εκφρασμένες σε μοίρες είναι οι εξής: η μέγιστη κλίση ισούται με 77°, ενώ η μέση κλίση είναι 24° σύμφωνα με το Σχήμα 2.6.

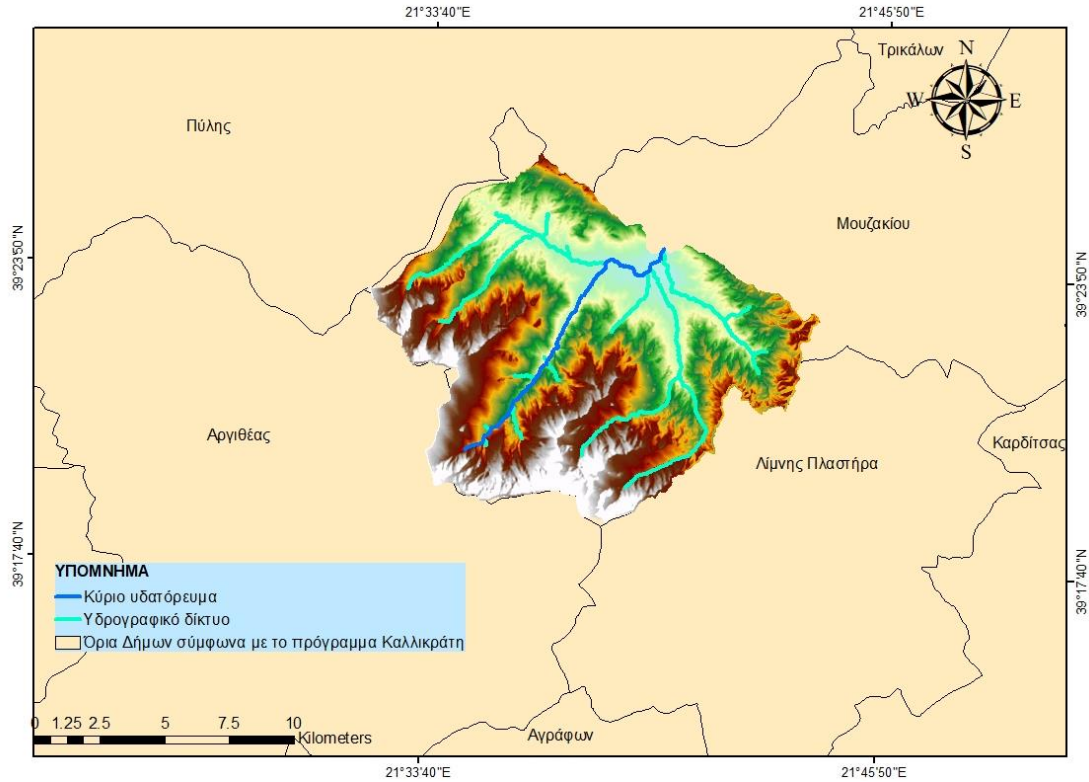


Σχήμα 2.5: Υψομετρικό ΨΜΕ της υπολεκάνης απορροής (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



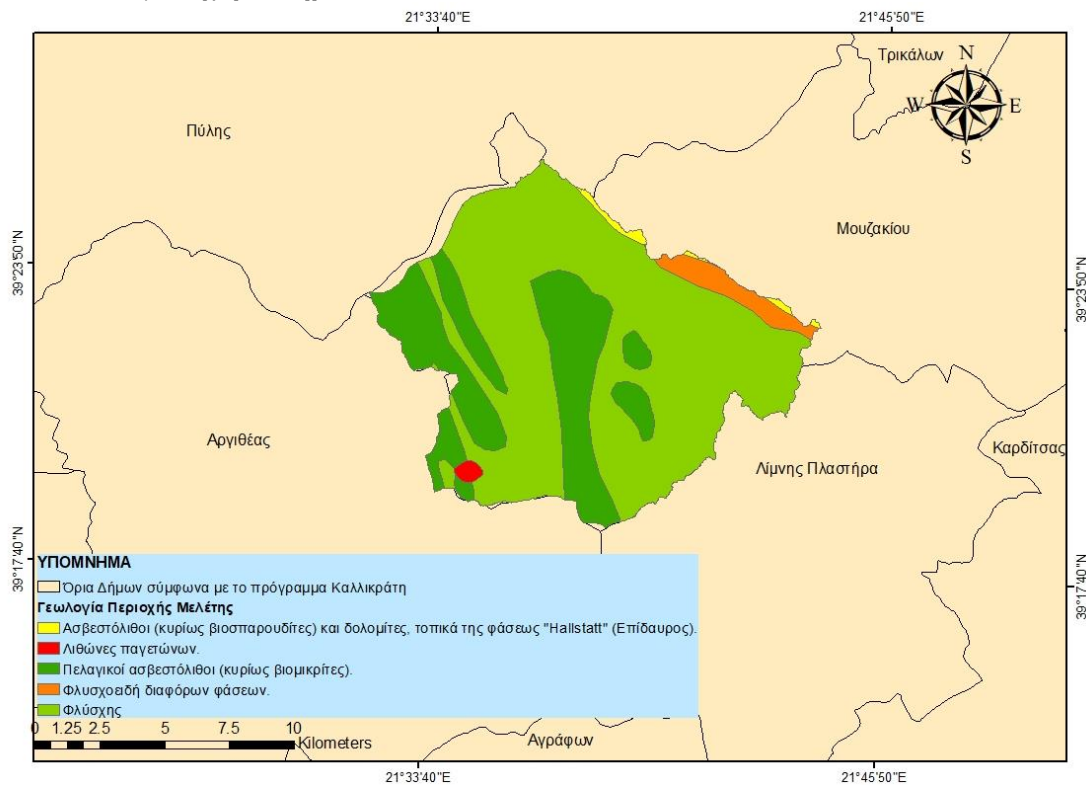
Σχήμα 2.6: Κλίσεις (°) της υπολεκάνης απορροής (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Το μήκος του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής είναι 14 km και η μέση πυκνότητά του δηλαδή ο λόγος του αθροίσματος όλων των κλαδών του υδρογραφικού δικτύου προς το εμβαδόν της λεκάνης που περικλείει το δίκτυο προκύπτει $0.49 \frac{km}{km^2}$. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται το υδρογραφικό δίκτυο της υπολεκάνης μελέτης.



Σχήμα 2.7: Υδρογραφικό δίκτυο της υπολεκάνης απορροής (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

2.1.3 Γεωλογικά χαρακτηριστικά



Σχήμα 2.8: Χάρτης γεωλογίας της περιοχής μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη από ΙΓΜΕ η περιοχή μελέτης όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα 2.8 αποτελείται κυρίως από δυο κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών: τον φλύσχη στην ζώνη Πίνδου στο μεγαλύτερο κομμάτι της και τον πελαγικό ασβεστόλιθο της ζώνης Πίνδου σε κάποιες μικρές περιοχές.

Ο φλύσχη της ζώνης Πίνδου αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών, ασβεστιτικών ψαμμιτών και αργιλικών σχιστόλιθων, με φακοειδείς ενστρώσεις κροκαλοπαγών ποικίλης λιθολογικής σύστασης και πάχους. Στην βάση του οι ψαμμίτες είναι αδρόκοκκοι, συμπαγείς και χωρίς παρεμβολές αργιλικών σχιστόλιθων και σχηματίζουν πάγκους ως και 2 m πάχος. Ο υπολογισμός του πάχους του φλύσχη δεν είναι εφικτός να πραγματοποιηθεί με ακρίβεια εξαιτίας της έντονης τεκτονικής του. Σε κάποιες θέσεις το πάχος του ξεπερνάει τα 1000 m (Αυγερός 2020).

Όσον αφορά τον ανωκρητιδικό πελαγικό ασβεστόλιθο της ζώνης Πίνδου αποτελείται από πλακώδεις, με κονδύλους και ενστρώσεις λευκών ερυθρών και μαύρων στα κατώτερα μέλη πυριτόλιθων καθώς και λεπτές στρώσεις ερυθρών και πράσινων αργιλικών σχιστόλιθων και μαργών. Σε κάποιες θέσεις μέσα σ' αυτούς απαντούν στρώματα κλαστικών κρυσταλλικών ασβεστόλιθων. Οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι αναπτύσσονται σε στρώματα και παρουσιάζουν κελυφοειδή θραύση, το χρώμα τους είναι λευκό, πρασινωπό και στην βάση ερυθρό. Το συνολικό πάχος του ασβεστόλιθου της ζώνης Πίνδου εκτιμάται στα 300 m (Αυγερός 2020). Αναλυτικά, τα ποσοστά εδάφους στην περιοχή μελέτης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1:

Πίνακας 2.1: Ποσοστό έκτασης γεωλογικών σχηματισμών της υπολεκάνης μελέτης
(Πηγή: ίδια επεξεργασία)

ΖΩΝΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΈΚΤΑΣΗ(km ²)	ΕΚΤΑΣΗ(%)
ΜΕΤΑΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΚΑΙ ΒΡΑΔΥΤΕΚΤΟΝΙ	Λιθώνες παγετώνων	0.65	0.47
ΖΩΝΗ ΠΙΝΔΟΥ	Πελαγικοί ασβεστόλιθοι (κυρίως βιομικρίτες)	37.81	27.12
ΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ ΖΩΝΗ	Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες) και δολομίτες, τοπικά της φάσεως "Hallstatt" (Επίδαυρος)	1.18	0.85
ΖΩΝΗ ΠΙΝΔΟΥ	Φλύσχης	95.05	68.18
ΒΟΙΩΤΙΤΙΚΟΣ ΦΛΥΣΧΗΣ	Φλυσχοειδή διαφόρων φάσεων	4.71	3.38
		Σ 139.40	Σ 100

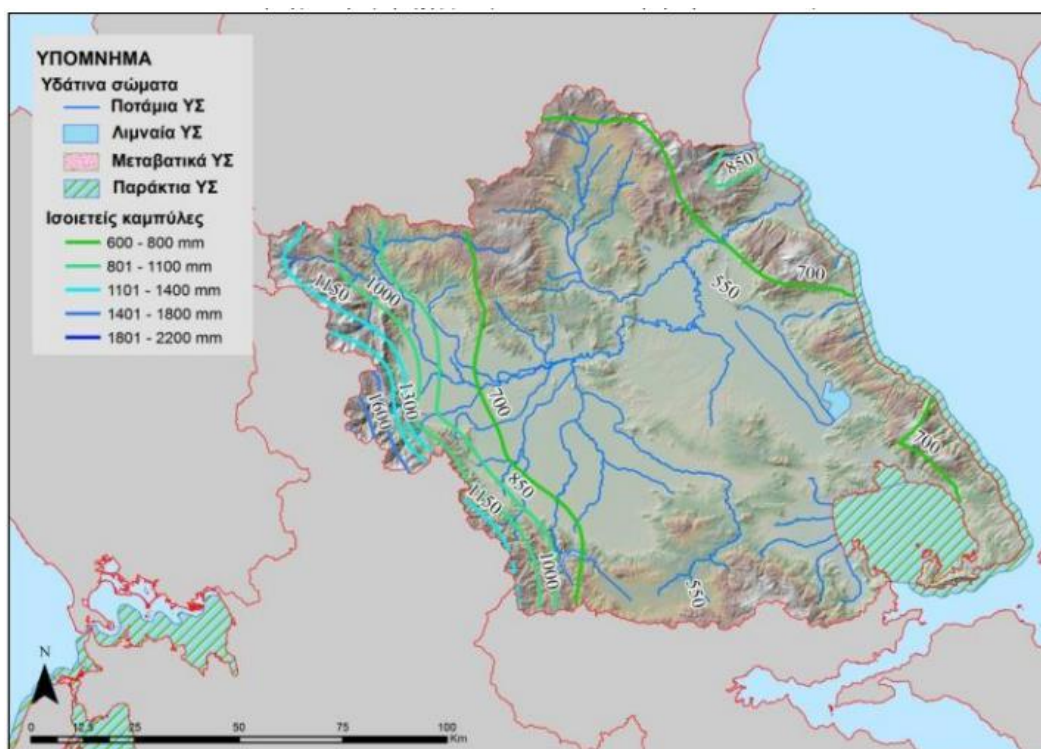
2.1.4 Κλιματικά χαρακτηριστικά

Το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας χωρίζεται σε τρεις βασικές περιοχές: την ανατολική παράκτια και ορεινή περιοχή, στην οποία επικρατεί μεσογειακό κλίμα, την κεντρική πεδινή περιοχή, η οποία διαθέτει ηπειρωτικό κλίμα και τη δυτική ορεινή περιοχή, με ορεινό κλίμα (1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας (EL 08) 2017).

Γενικότερα, η μέση ετήσια θερμοκρασία του διαμερίσματος κυμαίνεται από 16 °C έως 17 °C. Σε ετήσια βάση, το θερμομετρικό εύρος μπορεί να ξεπεράσει τους 22 °C. Οι μήνες με τη μεγαλύτερη θερμοκρασία είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος, ενώ με τη χαμηλότερη ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί αποτελούν συχνό φαινόμενο και εμφανίζονται την περίοδο Νοεμβρίου- Απριλίου (1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας (EL 08) 2017).

Όσον αφορά στο ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων του διαμερίσματος της Θεσσαλίας παρατηρείται ότι είναι σχετικά μεγάλο στο δυτικό τμήμα και συνεχίζοντας στις πεδινές περιοχές μειώνεται όπου αυξάνει πάλι στο ορεινό τμήμα στα ανατολικά. Συγκεκριμένα, στον σταθμό της Λάρισας η ετήσια βροχόπτωση εκτιμάται στα 468 mm, στον σταθμό του Τυρνάβου 550 mm και στον πιο ορεινό σταθμό του Μουζακίου 1142 mm (Κουτσογιάννης , 1988). Συνολικά, η μέση ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση εκτιμάται στα 678 mm . Οι μήνες με τη μεγαλύτερη βροχόπτωση παρατηρούνται από τον Οκτώβριο μέχρι τον Ιανουάριο, ενώ με τη μεγαλύτερη ξηρασία το διάστημα Ιουλίου ως και Αυγούστου. Τέλος, οι χιονοπτώσεις αποτελούν συχνό φαινόμενο κυρίως στις ορεινές περιοχές της Θεσσαλίας όπου το φαινόμενο γίνεται πιο έντονο από τα νότια προς τα βόρεια και από ανατολικά προς τα δυτικά (1^η Αναθεώρηση του

Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας (ΕΛ 08) 2017). Στο παρακάτω Σχήμα 2.9, παρουσιάζονται οι ισοιειείς καμπύλες των υψών βροχής για όλο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας.



Σχήμα 2.9: Ύψη βροχής του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας (Πηγή: (1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας (ΕΛ 08) 2017))

2.2 Ανθρωπογενή χαρακτηριστικά

2.2.1 Πληθυσμός

Ο πληθυσμός του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας, από τα απογραφικά στοιχεία της ΕΣΥΕ το έτος 1991 ήταν 730945 κάτοικοι και το 2001 αυξήθηκε κατά 2.7% στους 750445 κατοίκους (ο υπολογισμός του πληθυσμού του 2001 έγινε κατ' εκτίμηση, με βάση τον πληθυσμό των νομών του 2001 και σε σχέση με τα ποσοστά που συμμετείχαν σε κάθε νομό στο υδατικό διαμέρισμα του 1991). Εφαρμογή της ίδιας μεθόδου έγινε για τους Καλλικρατικούς Δήμους και τα τμήματά τους που ανήκουν στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας οι οποίοι εφαρμόστηκαν το 2011 όπου σύμφωνα με την απογραφή του 2011 εκτιμάται μείωση 2.6 % του πληθυσμού σε σχέση με το 2001 δηλαδή στους 730759 κατοίκους (1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του ΥΔ Θεσσαλίας (ΕΛ 08) 2017). Ο πληθυσμός του Δήμου Μουζακίου στον οποίο πραγματοποιείται η υδραυλική προσομοίωση ήταν 25968 κάτοικοι με βάση την απογραφή του 2001. Την επόμενη δεκαετία παρατηρήθηκε σημαντική μείωση κατά 49.5 % του πληθυσμού σε σχέση με το 2001 με τον αριθμό των κατοίκων να εκτιμάται στους 13122 σύμφωνα με την απογραφή του 2011.

2.2.2 Οικονομία

Το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (Α.Ε.Π) της Περιφέρειας της Θεσσαλίας, αυξανόταν κατά την περίοδο 2000-2004 με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με την Ελλάδα καθώς και την Ευρωπαϊκή Ένωση δηλαδή το έτος 2004 αντιστοιχούσε στο 88 % του ΑΕΠ της Ελλάδας και 83 % του ΑΕΠ της ΕΕ27 (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Θεσσαλίας, 2014-2020). Έπειτα, μετά το 2005 υπήρξε πτώση του 12 % σε σχέση με το 2004, υπήρχε μια αύξηση το 2008 όχι όμως στα επίπεδα του 2004. Από το 2009 το κατά κεφαλήν ΑΕΠ της Θεσσαλίας μειωνόταν σημαντικά σε σχέση με την Ελλάδα με μείωση 18% μεταξύ των ετών 2008-2011, όπου είχε ως αποτέλεσμα το 2011 να αντιστοιχεί στο 71% ΑΕΠ της Χώρας και στο 56 % της ΕΕ27 (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Θεσσαλίας, 2014-2020).

Όσον αφορά στον πρωτογενή τομέα, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντικός για την Περιφέρεια καθώς και για τη Χώρα όπου η συνολική ΑΠΑ της Θεσσαλίας στην συνολική ΑΠΑ της χώρας αντιστοιχεί στο 5%. Η φυτική παραγωγή στην περιοχή της Θεσσαλίας κατέχει την πρώτη θέση σε σχέση με τις υπόλοιπες Περιφέρειες της Ελλάδας με έμφαση στο σκληρό σιτάρι και στα νωπά λαχανικά. Γενικότερα ο κλάδος των τροφίμων όπως παρασκευασμένα λαχανικά και φρούτα, γαλακτοκομικά προϊόντα και δημητριακά διατηρεί την πρώτη θέση διαχρονικά με μέση ετήσια αύξηση 4.8 % κατά την περίοδο 2008-2012 και εξαγωγές ύψους 396 € εκατομμύρια το 2012 όπου αποτελεί το 36.5 % των εξαγωγών της Θεσσαλίας. Σαν δεύτερο πιο εξαγωγίμο προϊόν αντιστοιχεί το βαμβάκι με ποσοστό 15 % των εξαγωγών με μέση ετήσια αύξηση 20.4 % την περίοδο 2008-2012 (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Θεσσαλίας, 2014-2020).

Ο δευτερογενής τομέας της Περιφέρειας Θεσσαλίας είναι κι αυτός καθοριστικός για την οικονομία της, με ποσοστό εκτιμώμενο στο 18 % έναντι 16 % της Ελλάδας το 2011. Από το 2007 μέχρι το 2011 υπήρξε σημαντική μείωση ιδιαίτερα την χρονία 2009. Η κυρίαρχη δραστηριότητα του τομέα είναι η Μεταποίηση με ποσοστό 76 % στην ΑΠΑ του δευτερογενή τομέα το έτος 2011, ακόμα και με την μεγάλη μείωση της δραστηριότητας. Η δεύτερη δραστηριότητα του δευτερογενή τομέα είναι ο Κατασκευαστικός Κλάδος, με μεγάλη μείωση την περίοδο 2007-2011. Η σημασία του δευτερογενούς τομέα είναι πολύ μεγάλη διότι συνδέεται σημαντικά με τον πρωτογενή τομέα ειδικά στο πλαίσιο μεταποίησης αγροτικών προϊόντων όπως επίσης και του κλάδου του μετάλλου και των κατασκευών (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Θεσσαλίας, 2014-2020).

Τέλος, ο τριτογενής τομέας αυξανόταν συνεχώς μέχρι το 2009 με μια μικρή πτώση του αυτό το έτος με ποσοστό 65 %-73 % (συγκεκριμένα 73.2 % το έτος 2011) στην συνολική ΑΠΑ της Περιφέρειας με το αντίστοιχο ποσοστό του τριτογενούς τομέα της Ελλάδας στο 81 %. Κυρίαρχη δραστηριότητα του τομέα είναι η Δημόσια Διοίκηση με ποσοστό 32 % με 35 % της ΑΠΑ μέχρι το 2009 τόσο σε αξία όσο και σε συμμετοχή. Δεύτερη δραστηριότητα του τομέα το 2011 είναι το Εμπόριο και οι υπηρεσίες με ποσοστό 29 % της ΑΠΑ του τριτογενούς τομέα με διαρκή αύξηση μέχρι και το 2008 ως κυρίαρχη δραστηριότητα αλλά μετά με σημαντική πτώση μέχρι και το 2011. Τρίτη μεγαλύτερη δραστηριότητα του τριτογενούς τομέα είναι η Διαχείριση ακίνητης περιουσίας με ποσοστό 16 %-17 % της ΑΠΑ της Θεσσαλίας με διαρκή αύξηση από το

2005 μέχρι το 2009 σε αξία καθώς και συμμετοχή. Οι υπόλοιπες δραστηριότητες του τριτογενούς τομέα είναι σχετικά μικρής αξίας και με μειούμενο ποσοστό με μοναδική εξαίρεση τις τουριστικές δραστηριότητες, οι οποίες εξελίσσονται σημαντικά (Επιχειρησιακό πρόγραμμα Θεσσαλίας, 2014-2020).

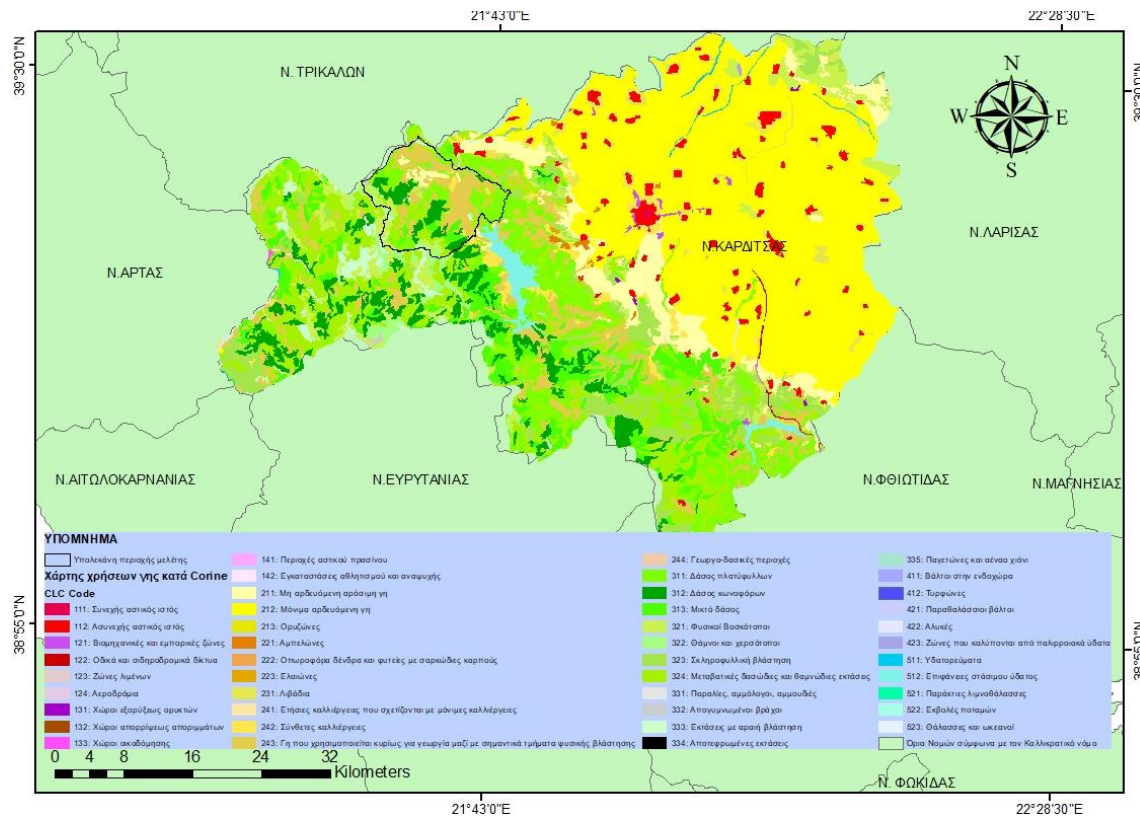
Όσον αφορά το Δήμο Μουζακίου, στηρίζεται κυρίως στο πρωτογενή τομέα παραγωγής. Η πλειοψηφία του πληθυσμού ασχολείται με δραστηριότητες της γεωργίας και της κτηνοτροφίας καθώς παραχωρούνται αρκετές εκτάσεις γης από τον Δήμο. Επίσης, παράγεται ένας σημαντικός αριθμός παραδοσιακών τοπικών προϊόντων. (Επιχειρησιακό πρόγραμμα δήμου Μουζακίου 2014-2019).

2.2.3 Χρήσεις γης

Η ανάλυση της υπολεκάνης μελέτης για τις διάφορες χρήσεις γης πραγματοποιήθηκε μέσω του Ευρωπαϊκού προγράμματος Copernicus Land Monitoring Service το οποίο διατίθεται ελεύθερο για χρήση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης Corine Land Cover του έτους 2018 μέσω δορυφορικών εικόνων της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας όπου γίνεται μετατροπή των χαρτών κάλυψης γης σε χάρτες χρήσεων γης με εικόνες υψηλής ανάλυσης.

Αρχικά, η περιοχή του νομού Καρδίτσας σύμφωνα με το Σχήμα 2.10 μπορεί να χαρακτηριστεί δασική κυρίως σε μεγάλα υψόμετρα νότια και νοτιοανατολικά της περιοχής μελέτης. Στο νότιο και νοτιοδυτικό κομμάτι παρατηρούνται και περιοχές υδατορεύματος. Στα χαμηλότερα υψόμετρα στο κεντρικό καθώς και στο βόρειο τμήμα επικρατεί αγροτική γη με καλλιεργήσιμες περιοχές όπως επίσης και πολλές και αραιοκατοικημένες περιοχές αστικού ιστού. Κατάντη της περιοχής μελέτης στο Μουζάκι επικρατεί ασυνεχής αστικός ιστός καθώς επίσης και μη αρδευόμενη αρόσιμη γη.

Όσον αφορά την υπολεκάνη μελέτης αποτελείται σε μεγάλο ποσοστό από γη κατάλληλη για γεωργία και τμήματα φυσικής βλάστησης (31 %), από δάση πλατύφυλλων (19 %), από μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις (14 %) καθώς και δάση κωνοφόρων (13.5 %). Αναλυτικά, κάθε ποσοστό χρήσης γης της υπολεκάνης μελέτης παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.2:



Σχήμα 2.10: Χρήσεις γης κατά Corine Land Cover (2018) του Νομού Καρδίτσας και της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Πίνακας 2.2: Ποσοστό έκτασης χρήσεων γης στην υπολεκάνη μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

α/α	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΕΚΤΑΣΗ	
			(km^2)	(%)
1	211	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	5.49	3.94
2	231	Λιβάδια	0.45	0.32
3	242	Σύνθετες καλλιέργειες	1.77	1.27
4	243	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	43.27	31.04
5	311	Δάσος πλατύφυλλων	26.47	18.99
6	312	Δάσος κωνοφόρων	18.88	13.54
7	313	Μικτό δάσος	5.33	3.82
8	321	Φυσικοί Βοσκότοποι	9.83	7.05
9	322	Θάμνοι και χερσότοποι	3.97	2.85
10	323	Σκληροφυλλική βλάστηση	2.37	1.70
11	324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	19.10	13.70
12	332	Απογυμνωμένοι βράχοι	0.45	0.32
13	333	Εκτάσεις με αραρή βλάστηση	2.01	1.45
			Σ 139.40	Σ 100.00

2.3 Ιστορικό πλημμυρών

2.3.1 Ιστορικά γεγονότα πλημμύρας

Τα τελευταία χρόνια έχουν καταγραφεί πάνω από εκατό γεγονότα πλημμυρών στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας. Στη Θεσσαλία οι υετοί αρχίζουν κατά το μήνα Οκτώβριο και διαρκούν έως τον Απρίλιο. Αυτοί προκαλούν πλημμυρικά γεγονότα καθώς πραγματοποιούνται με έντονες βροχοπτώσεις σε αντίθεση με την Νότια Ελλάδα που γίνεται με τη μορφή καταιγίδων (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας 2018).

Συγκεκριμένα, τα φαινόμενα πλημμυρικού κινδύνου οφείλονται στις συνεχείς και έντονες βροχοπτώσεις και από καταιγίδες που εκδηλώνονται ταχύτατα. Πιο σπάνια, οφείλονται σε γρήγορο λιώσιμο του χιονιού. Κυριαρχικό ρόλο στα πλημμυρικά φαινόμενα διαδραματίζουν ο Πηνειός με τους παραποτάμους του δηλαδή τον Φαρσαλιώτη, τον Ενιπέα και τον Σοφαδίτη οι οποίοι αποτελούνται από μεγάλες λεκάνες απορροής (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας 2018).

Η περιοχή της Καρδίτσας έχει πληγεί σε σημαντικό βαθμό εξαιτίας των πλημμυρικών φαινομένων. Τα κυριότερα πλημμυρικά επεισόδια τα τελευταία είκοσι δύο έτη σύμφωνα με την μετεωρολογική υπηρεσία είναι τα εξής:

- 11/1/2022: Η κακοκαιρία «Διομήδης» είχε ως αποτέλεσμα να υπάρξουν πλημμυρικά φαινόμενα στην περιοχή της Καρδίτσας. Συγκεκριμένα, στις 12/1/2022 κατά τη διάρκεια της νύχτας στην Κοσκινά της Καρδίτσας έσπασε το φράγμα του ποταμού Καλέντζη και απείλησε τους οικισμούς Κοσκινά και Ψαθοχώρι σύμφωνα με την μετεωρολογική αρχή. Επίσης, το πλημμυρικό φαινόμενο εξαιτίας αυτής της κακοκαιρίας έπληξε και τον Δήμο Μουζακίου όπου στην συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιείται υδραυλική προσομοίωση και βρίσκεται κατάντη της υπολεκάνης που μελετάται. Αποτέλεσμα της κακοκαιρίας « Διομήδης » ήταν να πλημμυρίσουν αρκετές καλλιεργήσιμες εκτάσεις καθώς και η διακοπή οδικών αξόνων εξαιτίας της αύξησης της στάθμης των ποταμών.
- 17/9/2020: Ο μεσογειακός Κυκλώνας «Ιανός» είχε ως αποτέλεσμα να προκαλέσει καταστροφική πλημμύρα στην περιοχή της Καρδίτσας με σοβαρά προβλήματα σε υποδομές, ηλεκτροδότηση και υδροδότηση. Στο Δήμο Μουζακίου η κατάσταση ήταν εξαιρετικά κρίσιμη με αποτέλεσμα την καταστροφή υποδομών, την πλημμύρα πολλών καλλιεργειών καθώς και διάβρωση εδάφους και κατολισθήσεις. Αξίζει να σημειωθεί, η κατάρρευση της γέφυρας «Μπαλάνου» με ιστορία 70 ετών που είχε σαν συνέπεια την αποκοπή της Κοινότητας Πευκοφύτου από το Δήμο Μουζακίου καθώς και όλη η Ανατολική Αργιθέα από την πρόσβαση προς τον οικισμό του Μουζακίου.
- 13/1/2018: Η κακοκαιρία Θησέας είχε σαν συνέπεια την προληπτική εκκένωση οικισμού στην Καρδίτσα εξαιτίας πιθανού κινδύνου υπερχειλίσης ρεμάτων.

- 29/12/2012: Λόγω εντόνων βροχοπτώσεων, υπερχείλισαν ο ποταμός Καλέντζης, ο παραπόταμος Καράμπαλης με αποτέλεσμα πλημμυρικά φαινόμενα σε αγροτικές εκτάσεις.
- 2/8/2012: Εξαιτίας καταιγίδων προκλήθηκαν μεγάλες καταστροφές στους Δήμους Καρδίτσας και Σοφάδων με αποτέλεσμα να υπάρξουν ζημιές σε μεγάλη έκταση καλλιεργειών. Επίσης, οι καταιγίδες είχαν σαν συνέπεια την καταστροφή υποδομών και την ξεριζώση δέντρων.
- 5/2/2012: Στην περιοχή Μαύρικα, του Δήμου Καρδίτσας, υπερχείλισε ο ποταμός Καλέτζης με αποτέλεσμα να πλημμυρίσουν γεωργικές εκτάσεις. Από τις ισχυρές βροχοπτώσεις συγκεντρώθηκε μεγάλος όγκος υδάτων στην περιοχή.
- 10/8/2008: Πλημμύρες σε σπίτια και καταστήματα στους Σοφάδες και στον Παλαμά Καρδίτσας.
- 23/9/2006: Πλημμύρες στην Καρδίτσα με αποτέλεσμα να επηρεαστούν οι γεωργικές εκτάσεις και οι υποδομές.
- 17/2/2003: Εκτεταμένες καθιζήσεις, πλημμύρες και ζημιές σε αγροτικούς δρόμους και καλλιέργειες στην Καρδίτσα.

2.3.2 Ανάλυση μηχανισμών πλημμύρας

Ένας μελετητής πραγματοποίησε επιτόπια έρευνα για τον εντοπισμό προβλημάτων σχετικά με το ζήτημα των πλημμυρών της Θεσσαλίας και πήγε στις Περιφερειακές Ενότητες της Καρδίτσας, των Τρικάλων, της Λάρισας, της Μαγνησίας όπως επίσης και στην Περιφέρεια Θεσσαλίας καθώς και στην Αποκεντρωμένη Διοίκηση της Θεσσαλίας. Επομένως, με βάση την επίσκεψη του μελετητή στη λεκάνη του Πηνειού διαπιστώθηκαν οι εξής μηχανισμοί πλημμύρας (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας 2018):

- Φυσική υπερχείλιση
- Αστοχία των αναχωμάτων ή των υποδομών
- Υπέρβαση των αναχωμάτων
- Εξαιτίας των φερτών υλικών προκαλείται παρεμπόδιση της ροής ή γίνεται έμφραξη χειμάρρων σε αστικές περιοχές.

Πιο συγκεκριμένα, για την Περιφερειακή Ενότητα της Καρδίτσας στην οποία εντάσσεται και η περιοχή μελέτης σύμφωνα με τη Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών οι μηχανισμοί πλημμύρας αποτελούνται από (Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας 2018):

- Συνεχείς προσχώσεις εξαιτίας των φερτών υλικών στις κοίτες των ποταμών.
- Συσσώρευση φερτών και φυτικών υλικών σε ανοίγματα γεφυρών.

- Φθορές σε αναχώματα εξαιτίας των ανθρώπινων ενεργειών καθώς και από φυσικούς λόγους.

- Θραύση των αναχωμάτων.

- Την περίοδο της άνοιξης γίνεται κατασκευή αναχωμάτων για αρδευτική χρήση. Τα αναχώματα αυτά θα έπρεπε να απομακρύνονται πριν την έναρξη της υγρής περιόδου δηλαδή το Σεπτέμβριο πράγμα το οποίο συνήθως παραλείπεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα μέρος των αναχωμάτων αυτών να παρασύρεται από τη ροή όταν υπάρχει πλημμυρικό φαινόμενο οπότε συμμετέχουν στη συγκέντρωση φερτών υλικών κατάντη με αποτέλεσμα επίσης την ανύψωση της στάθμης του νερού και την κατάκλιση των γύρω περιοχών.

- Τα αναχώματα αυτά κάποιες φορές τροποποιούνται ώστε να περαστούν αγωγοί άρδευσης. Πολλές φορές η μετέπειτα αποκατάστασή τους γίνεται λανθασμένα με αποτέλεσμα οι θέσεις αυτές που τροποποιήθηκαν να είναι ευάλωτες σε θραύση.

- Η έλλειψη συντήρησης των αναχωμάτων τα καθιστά ευάλωτα σε περίπτωση φόρτισής τους.

Επιπλέον σε συγκεκριμένες περιοχές:

- Διακρίνονται προβλήματα στην περιοχή της συμβολής των Εννιπέα, Φαρσαλίτη, Καλέντζη με τον Πηνειό ποταμό. Η υπηρεσία πραγματοποιεί καθαρισμούς καθώς και απομάκρυνση φερτών υλικών.

- Στον ποταμό Μέγα πραγματοποιήθηκαν αντιπλημμυρικά έργα για τον περιορισμό του φαινομένου των πλημμυρών.

- Όσον αφορά το φράγμα Σμοκόβου η δημιουργία του έχει περιορίσει το φαινόμενο των πλημμυρών στις πεδινές περιοχές κατάντη. Πάρα ταύτα, θεωρείται σημαντικό η μελέτη και η κατασκευή έργων ανάσχεσης και σε άλλες θέσεις.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Περιβάλλον εργασίας-λογισμικά

Τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

- ArcGIS 10.5.1: Είναι ένα λογισμικό Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) δηλαδή ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απόδοσης πληροφοριών το οποίο αναφέρεται σε φαινόμενα όπου διαδραματίζονται στο γεωγραφικό χώρο (Goodchild, 1985). Το ακρωνύμιο G.I.S προκύπτει από τις λέξεις (Geographical Information System) και στα Ελληνικά: Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π).

- HEC- GeoHMS 10.5: Είναι μια πρόσθετη εργαλειοθήκη του ArcGIS όπου με τον συνδυασμό τους υλοποιήθηκε η γεωμορφολογική ανάλυση της περιοχής μελέτης. Το ακρωνύμιο HEC προκύπτει από τις λέξεις (Hydrologic Engineering Center) και το GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension).

- HEC- HMS 4.3: Με το πρόγραμμα αυτό υλοποιήθηκε η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής που πραγματοποιείται η μελέτη. Το ακρωνύμιο HMS προέρχεται από τις λέξεις (Hydrology Modeling System).

- HEC – RAS 5.0.7: Με το λογισμικό πραγματοποιήθηκε η υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης. Το ακρωνύμιο RAS σημαίνει (River Analysis System).

- Microsoft Office 365 (Excel,Word, Power Point): Με τη χρήση των λογισμικών αυτών πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί , η συγγραφή καθώς και η παρουσίαση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, ακολουθεί μια λεπτομερέστερη παρουσίαση των λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της περιοχής μελέτης καθώς παρουσιάζεται και η μεθοδολογία της μελέτης αυτής.

3.2 Γεωμορφολογική ανάλυση

3.2.1 Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών – Το λογισμικό ArcGIS

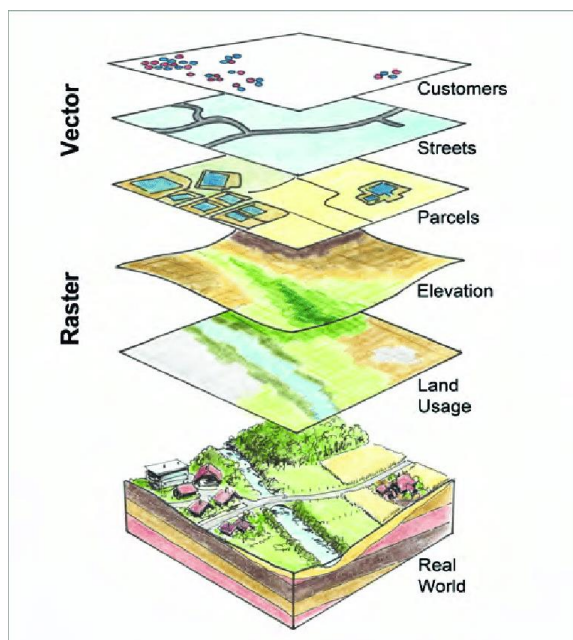
Τα δυο πιο διαδεδομένα πακέτα λογισμικών ΣΓΠ, είναι το QGIS και το ArcGIS. Η παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS.

Αρχικά, το πρόγραμμα ArcGIS περιέχει το ArcMap σαν μέρος των προγραμμάτων του ArcGIS. Τα δυο αυτά μέρη σχεδιάστηκαν από το Environmental Systems Research Institute (ESRI) στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Το λογισμικό, είναι ιδιαίτερα γνωστό στην αγορά και με μεγάλη αξιοπιστία. Προτιμάται από ποικίλες βιομηχανίες και εργασιακούς χώρους του ιδιωτικού και δημόσιου τομέα, και απαιτείται ειδική άδεια για το λογισμικό.

ΣΓΠ καλείται ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απόδοσης πληροφοριών το οποίο αναφέρεται σε φαινόμενα όπου διαδραματίζονται στο γεωγραφικό χώρο (Goodchild, 1985).

Η διαχείριση των γεωγραφικών πληροφοριών αποτελούσε μεγάλη πρόκληση στο παρελθόν, όπου οι αρμόδιοι επιστήμονες καλούνταν να δώσουν λύσεις για τη συλλογή καθώς και την επεξεργασία των πληροφοριών αυτών. Η όλο και μεγαλύτερη εξέλιξη της τεχνολογίας είχε ως αποτέλεσμα την ανακάλυψη μεθόδων οι οποίες ψηφιοποιούσαν αυτές τις πληροφορίες και τις διαχειριζόντουσαν με περισσότερη ευκολία και ευελιξία. Να σημειωθεί ότι, το κόστος της χαρτογραφικής εργασίας στο παρελθόν ήταν ιδιαίτερα υψηλό. Επομένως, όπως γίνεται αντιληπτό τα επόμενα χρόνια σχεδιάστηκαν λογισμικά ΣΓΠ ιδιαίτερα ελκυστικά, δημοφιλή και εμπορικά τα οποία ακόμα και σήμερα πρωταγωνιστούν.

Το επιστημονικό πεδίο που εφαρμόζονται τα ΣΓΠ είναι πάρα πολύ μεγάλο καθώς γίνεται χρήση του στις περιπτώσεις όπου εμπειρέχεται ως παράμετρος η γεωγραφική πληροφορία. Ενδεικτικά κάποιες χρήσεις του αφορούν: την χαρτογράφηση περιοχών, τη διαχείριση υδρολογικών φαινομένων, τις οικολογικές μελέτες, τον χωροταξικό και πολεοδομικό σχεδιασμό, τη διαχείριση αποβλήτων, το κτηματολόγιο κ.α (Καββαδά 2012). Να σημειωθεί ότι η χρήση του είναι ευρύτατη και σε πολλές άλλες επιστήμες (γεωπονίας, γεωγραφίας, βιολογίας, γεωλογίας). Επομένως, τα ΣΓΠ χρησιμοποιούνται ευρέως ειδικά την σημερινή εποχή από πολλές επιχειρήσεις και οργανισμούς. Το εύρος της εφαρμογή τους είναι πλέον τεράστιο και αποτελείται από απλές μέχρι και πολύ περίπλοκες εφαρμογές διαχείρισης γεωγραφικών πληροφοριών που έχουν ως στόχο τη λήψη κρίσιμων αποφάσεων. Τα πληροφοριακά επίπεδα των ΣΓΠ παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Πληροφοριακά επίπεδα του GIS Πηγή: (Gabathuler,Eckert and Ehrensperger 2012)

3.2.2 Γεωγραφικά δεδομένα

Τα γεωγραφικά δεδομένα είναι τα δεδομένα τα οποία μπορούν να εντοπισθούν στο γεωγραφικό χώρο δηλαδή την γη και μπορούν να χαρτογραφηθούν. Με τα γεωγραφικά δεδομένα επιτυγχάνεται η περιγραφή τους με βάση τέσσερα στοιχεία: τη θέση τους στο χώρο, την περιγραφή τους, τη χωρική και τη χρονική τους σχέση (Κάβουρας, Δάρρα, Κονταξάκη και Τομαή 2016). Τα ΣΓΠ επεξεργάζονται χωρικά και περιγραφικά δεδομένα καθώς και την αναπαράσταση των χωρικών δεδομένων.

Τα διανυσματικά μοντέλα αποτελούνται από τα χωρικά και περιγραφικά δεδομένα, ενώ με τα κανονικοποιημένα ή ψηφιδωτά μοντέλα πραγματοποιείται η αναπαράσταση των χωρικών δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί, ότι με τη χωρική πληροφορία εντοπίζεται η θέση καθώς και η γεωμετρία των δεδομένων με βάση ενός συστήματος αναφοράς. Τα περιγραφικά δεδομένα αφορούν ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των γεωγραφικών δεδομένων όπου το κάθε δεδομένο αυτού του είδους περιγράφεται μοναδικά. Το ΣΓΠ πολλές φορές συνδυάζει αυτά τα δεδομένα για την καλύτερη απεικόνιση της πληροφορίας (Κάβουρας, Δάρρα, Κονταξάκη και Τομαή 2016).

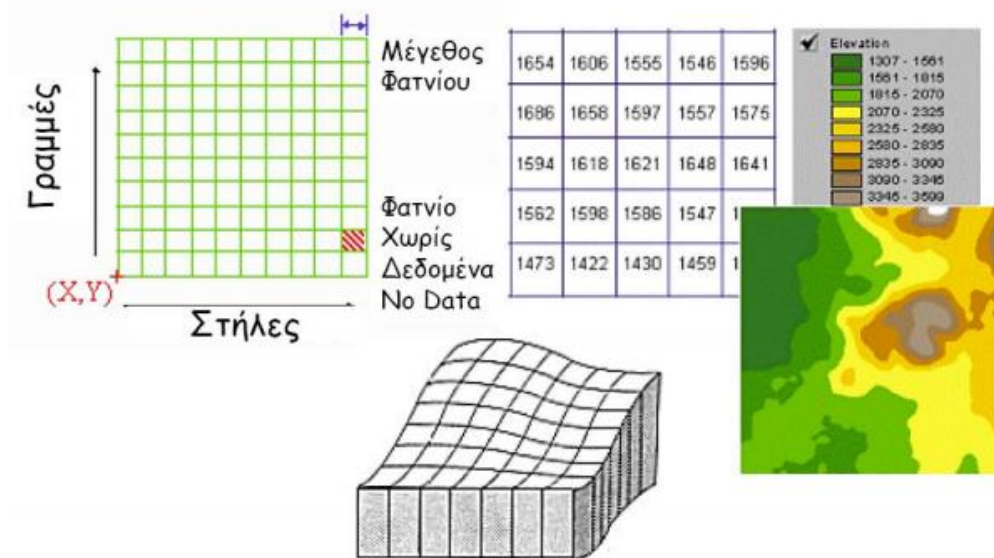
Τα γεωγραφικά δεδομένα λοιπόν, που εφαρμόζονται στα ΣΓΠ διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- Κανονικοποιημένα ή Ψηφιδωτά μοντέλα (Raster)
- Διανυσματικά μοντέλα (Vector)

Με το ψηφιδωτό μοντέλο όπως αναφέρθηκε παρέχεται η δυνατότητα αναπαράστασης του χώρου, το οποίο αποτελείται από τετραγωνικά σχήματα τα οποία καλούνται ψηφίδες ή κελιά (Χαλκιάς, 2006). Κάθε ψηφίδα είναι ανεξάρτητη σε σχέση με τις υπόλοιπες αλλά όλες μαζί συνθέτουν έναν κάναβο. Επιπλέον, κάθε κελί προσδιορίζεται με βάση μια συγκεκριμένη τιμή και το σύνολο αυτών των κελιών δύναται να απεικονίσουν κάποια πληροφορία στον χώρο.

Το διανυσματικό μοντέλο αναπαρίσταται στον χώρο μέσω σημειακής, γραμμικής ή και πολυγωνικής μορφής (Χαλκιάς, 2006). Αυτός ο τρόπος αναπαράστασης είναι πολύ βολικός για την επεξεργασία και την αποθήκευση δεδομένων τα οποία έχουν συγκεκριμένα διακριτά όρια, δηλαδή όρια διοικητικών μονάδων (π.χ δήμων), οικοδομικά τετράγωνα ή ακόμα και δρόμους (Burrough, 2000). Συνηθίζεται, τα διανυσματικά μοντέλα να ομαδοποιούνται εφόσον είναι κοινού είδους και είναι ικανά να περιγράψουν μια κοινή χωρική αναφορά (Chang, 2003).

Οι δύο αυτές κατηγορίες μοντέλων παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους και η επιλογή ανάμεσα του ψηφιακού και του διανυσματικού μοντέλου γίνεται ανάλογα την περίπτωση της κάθε εφαρμογής. Να σημειωθεί ότι και οι δύο τρόποι είναι απαραίτητοι για την περιγραφή του χώρου και πολλές φορές κρίνεται αναγκαία η μετατροπή από την μια περίπτωση στην άλλη. Στο παρακάτω Σχήμα 3.2 οπτικοποιείται η έννοια του κανονικοποιημένου χωρικού μοντέλου.



Σχήμα 3.2: Κανονικοποιημένο χωρικό μοντέλο Πηγή: (Σκοπελίτη και Στάμου , 2006)

3.2.3 Υλοποίηση γεωμορφολογικής ανάλυσης

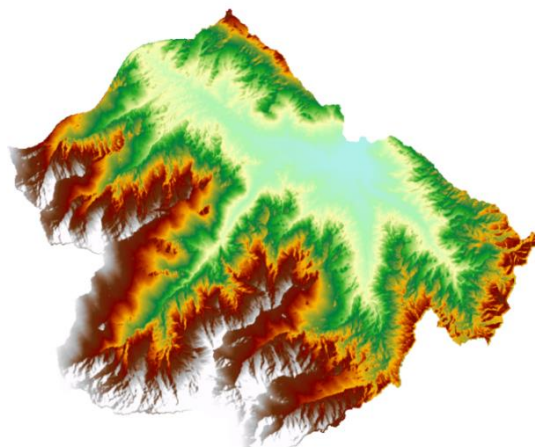
Η γεωμορφολογική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού (ArcGIS)10.5.1 της εταιρίας ESRI το οποίο είναι ΣΓΠ (GIS) καθώς και με το (HEC-GeoHMS) της U.S Army Corps of Engineers δηλαδή μιας πρόσθετης εργαλειοθήκης η οποία αποτελεί επέκταση του GIS.

Αρχικά, εισήχθη στο ArcGIS το απαραίτητο δεδομένο για την υλοποίηση της γεωμορφολογικής ανάλυσης που είναι το ΨΜΕ, το οποίο χορηγήθηκε από το Κτηματολόγιο Α.Ε για την περιοχή της Καρδίτσας. Το ΨΜΕ (DEM) είναι αρχείο μορφής raster όπου αποτελείται από πολλές ψηφίδες οι οποίες αναπαριστούν τα υψόμετρα της περιοχής σε μέτρα. Το μέγεθος κάθε εικονοστοιχείου είναι τετραγωνικό διαστάσεων 5 m x 5 m. Κάθε πινακίδα DEM έχει διαστάσεις στο έδαφος 4600 m x 3600 m, με περιμετρική επικάλυψη 300 m, και ακολουθεί τη διανομή ΕΓΣΑ87 κλίμακας 1:5000. Ο τύπος των αρχείων είναι img. Η γεωμετρική ακρίβεια του προϊόντος είναι $RMSEz \leq 2.00$ m και η απόλυτη ακρίβεια ≤ 3.92 m για επίπεδο εμπιστοσύνης 95 %.

Παρακάτω αναλύονται τα βήματα τα οποία έγιναν για τη γεωμορφολογική ανάλυση με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS καθώς και της επέκτασής του, HEC-GeoHMS:

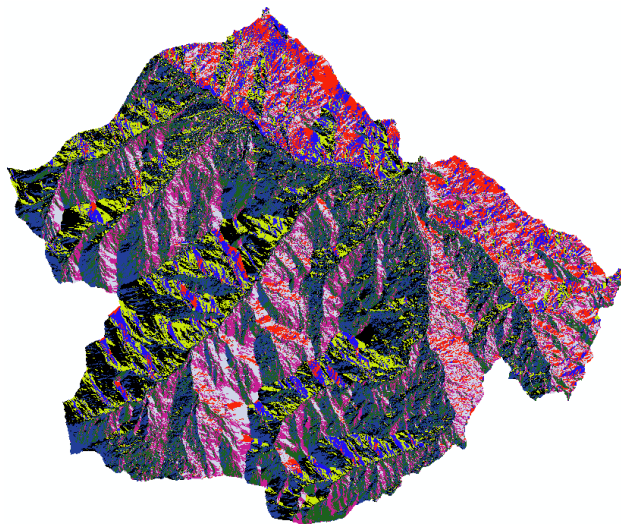
- i. **Fill Sinks:** Η εντολή αυτή, δέχεται σαν δεδομένο το ΨΜΕ και εξαλείφει τις ταπεινώσεις που ενδέχεται να υπάρχουν σ' αυτό καθώς επίσης γεμίζει και τις απαραίτητες ψηφίδες, ώστε το υδρογραφικό δίκτυο να είναι συνεχές και σωστά οριοθετημένο. Η εύρεση τέτοιων ψηφίδων προκύπτει από τις ψηφίδες οι οποίες έχουν χαμηλότερο υψόμετρο από τις οκτώ γειτονικές τους. Αξίζει να σημειωθεί, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος της κάθε ψηφίδας τόσο περισσότερες

ταπεινώσεις θα υπάρχουν στο ΨΜΕ. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.3 το Υψομετρικό ΨΜΕ της υπολεκάνης μελέτης είναι το ακόλουθο:



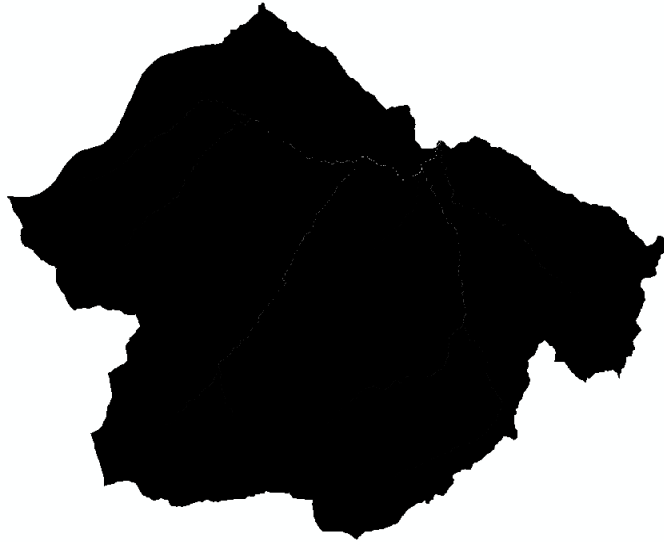
Σχήμα 3.3: Υψομετρικό ΨΜΕ της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

- ii. **Flow Direction:** Με την εντολή Flow direction προκύπτει η κατεύθυνση ροής κάθε ψηφίδας του ΨΜΕ. Συγκεκριμένα, η διαδικασία αυτή δέχεται σαν δεδομένο το ΨΜΕ από το οποίο έχουν εξαλειφθεί οι ταπεινώσεις των πιθανών ψηφίδων καθώς έχει γίνει και το γέμισμα των ψηφίδων όπου χρειάστηκε, όπως αναλύθηκε προηγουμένως και δίνει ως αποτέλεσμα τη διεύθυνση ροής κάθε ψηφίδας σε ένα αρχείο μορφής raster. Η κατεύθυνση ροής προκύπτει υπολογίζοντας τη μέγιστη κλίση μεταξύ της ψηφίδας και των οκτώ γειτονικών της ψηφίδων οι οποίες λαμβάνουν μια από τις ακόλουθες τιμές ανάλογα με τη θέση τους: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 και 128. Ο κানাβος κατεύθυνσης ροής της υπολεκάνης μελέτης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Κάναβος κατεύθυνση ροής της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

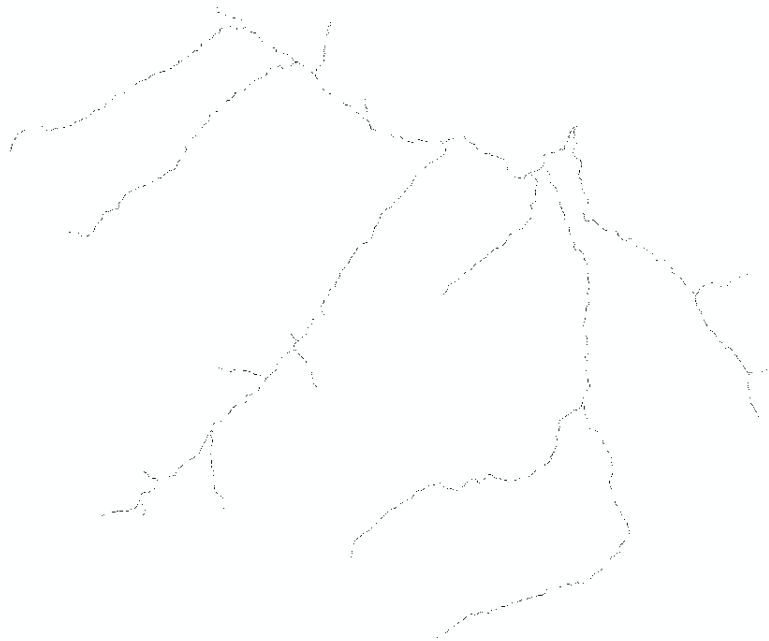
- iii. **Flow Accumulation:** Η διαδικασία αυτή, εφαρμόζεται στον κানাβο κατεύθυνσης ροής και έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή ενός αρχείου raster όπου σε κάθε ψηφίδα του αναγράφεται κάποιος αριθμός. Ο αριθμός αυτός, συμβολίζει πόσες ψηφίδες απορρέουν μέσω αυτού. Αυτή η πληροφορία είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς ψηφίδες με μεγάλο αριθμό σημαίνει ότι εκεί συγκεντρώνεται η ροή και υποδεικνύουν ύπαρξη πιθανού ποταμού. Ο κানাβος συγκέντρωσης ροής της υπολεκάνης μελέτης είναι ο ακόλουθος σύμφωνα με το Σχήμα 3.5.



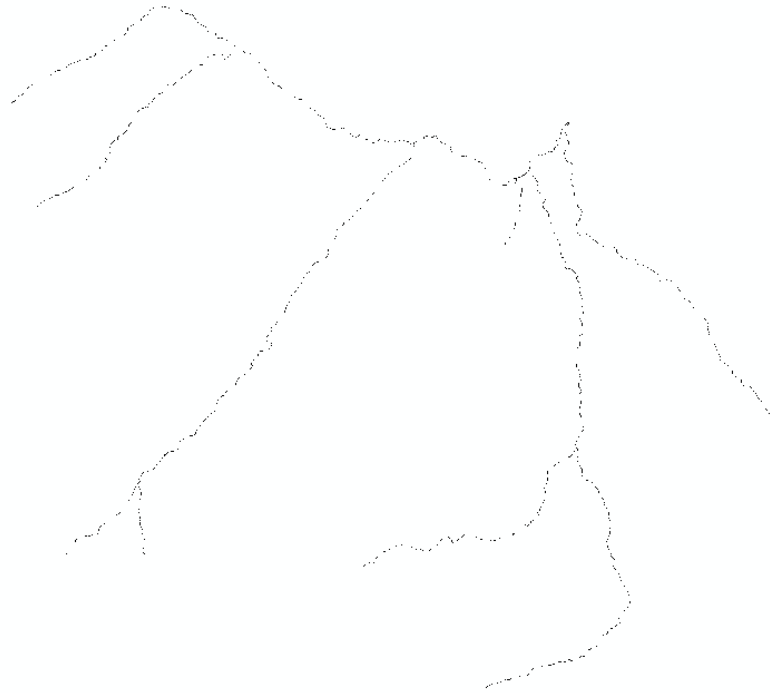
Σχήμα 3.5: Καναβος συγκέντρωσης ροής της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

- iv. **Stream definition:** Σ' αυτό το βήμα ορίζεται η τιμή του κατώφλιου ώστε να προκύψει το υδρογραφικό δίκτυο έχοντας σαν δεδομένο τον κানাβο συγκεντρωτικής ροής από την εντολή flow accumulation. Κατώφλι ορίζεται ο αριθμός των φατνίων από τον καναβο συγκέντρωσης ροής ο οποίος αριθμός καθορίζει ποια φατνία αποτελούν υδρογραφικό δίκτυο. Συγκεκριμένα, οι ψηφίδες του ΨΜΕ που έχουν χαμηλότερη τιμή από το κατώφλι δεν αποτελούν υδρογραφικό δίκτυο αλλά ανήκουν στην χερσαία ροή, ενώ οι υπόλοιπες ψηφίδες δηλαδή με τιμή μεγαλύτερη από το κατώφλι σχηματίζουν το υδρογραφικό δίκτυο. Όπως αναφέρθηκε, το κατώφλι είναι εκφρασμένο σε pixel τα οποία σχηματίζουν μια έκταση απορροής σε km^2 ανάντη του υδρογραφικού δικτύου η οποία εξαρτάται και από το μέγεθος των ψηφίδων. Η τιμή του κατώφλιου επηρεάζει το εξαγόμενο υδρογραφικό δίκτυο καθώς όσο μικρότερη είναι η τιμή του τόσο μεγαλώνει το υδρογραφικό δίκτυο και οι χρόνοι απορροής μειώνονται. Αντιθέτως, μεγάλες τιμές κατώφλιου δημιουργούν μικρότερο υδρογραφικό δίκτυο και οι χρόνοι απορροής αυξάνονται. Συνήθεις τιμές έκτασης απορροής των υδατορευμάτων είναι $1 km^2-5$

km^2 . Στη συγκεκριμένη περίπτωση για διαστάσεις ψηφίδας 5 m x 5 m και εμβαδόν λεκάνης $2 km^2$ και $5 km^2$ αντιστοιχούν σε 80000 ψηφίδες και 200000 ψηφίδες τα αντίστοιχα εμβαδά. Τα επόμενα βήματα της διαδικασίας έγιναν με εμβαδόν $2 km^2$ απλώς γίνεται μια σύγκριση και με $5 km^2$ στο συγκεκριμένο βήμα για λόγους εποπτείας. Πάρα ταύτα, η τιμή του κατώφλιού δεν είναι κάτι τυποποιημένο γι' αυτό το λόγο ορίζεται ως παράμετρος από το Χρήστη ώστε να αντιληφθεί τις διαφορές του υδρογραφικού δικτύου και να επιλέξει την τιμή που τον εξυπηρετεί. Στα παρακάτω Σχήματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζεται το υδρογραφικό δίκτυο για κατώφλι $2 km^2$ και $5 km^2$ αντίστοιχα.

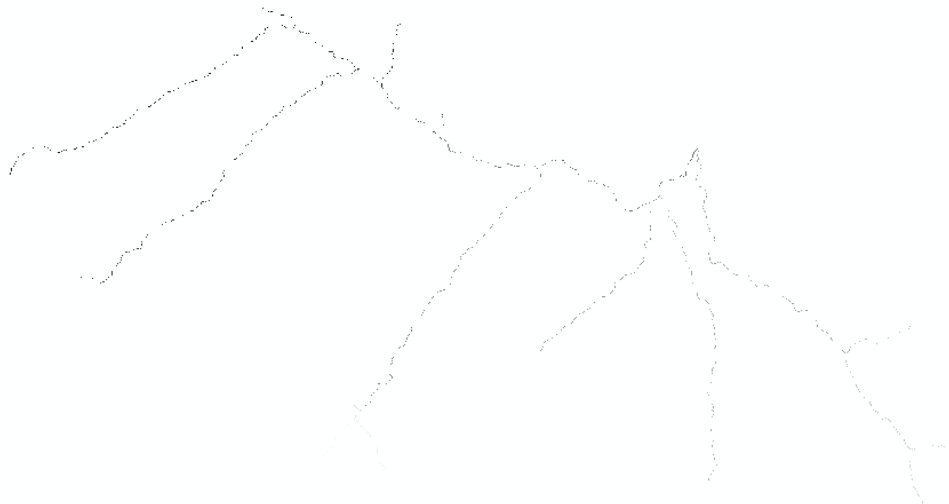


Σχήμα 3.6: Κατώφλι $2 km^2$ της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



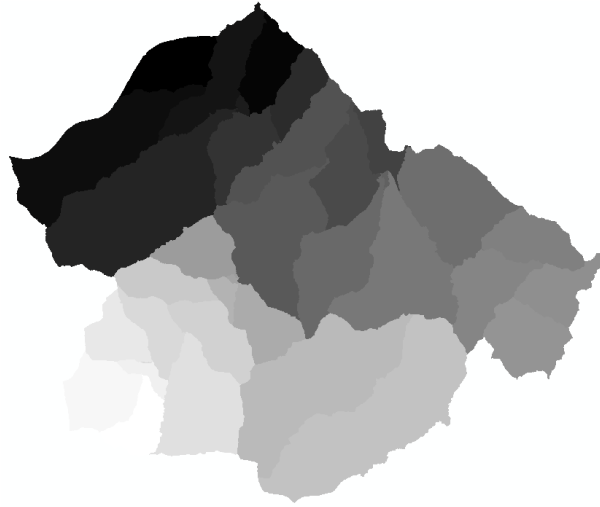
Σχήμα 3.7: Κατώφλι 5 km^2 της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

- v. **Stream Segmentation:** Με την εντολή αυτή, το υδρογραφικό δίκτυο που προέκυψε προηγουμένως χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα σύμφωνα με το Σχήμα 3.8. Στα σημεία που υπάρχουν συμβολές προκύπτουν κόμβοι και ανάμεσα σε δυο κόμβους ορίζεται ένας κλάδος. Να σημειωθεί ότι δεδομένα εισόδου της εντολής αυτής είναι το κατώφλι καθώς και ο κλίμακός κατεύθυνσης ροής.



Σχήμα 3.8: Διαχωρισμός υδατικού δικτύου της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

vi Catchment Grid Delineation: Για κάθε τμήμα υδατορεύματος που προέκυψε στο παραπάνω βήμα σύμφωνα με το Σχήμα 3.9 δημιουργείται μια υπολεκάνη έχοντας σαν δεδομένα τα αποτελέσματα από το flow direction και το stream segmentation.



Σχήμα 3.9: Δημιουργία υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

vii. **Catchment Polygon Processing:** Η εντολή αυτή, μετατρέπει τις υπολεκάνες που προέκυψαν προηγουμένως σε αρχείο vector σύμφωνα με το Σχήμα 3.10. Δέχεται σαν δεδομένο εισόδου την προηγούμενη διαδικασία δημιουργίας υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος.



Σχήμα 3.10: Δημιουργία υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος σε διανυσματική μορφή της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

- viii. **Drainage Line Processing:** Με τη διαδικασία αυτή, το υδρογραφικό δίκτυο μετασχηματίζεται σε αρχείο διανυσματικής μορφής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Δεδομένα εισόδου σ' αυτό το βήμα είναι ο διαχωρισμός υδατικού δικτύου και ο κλίμακας κατεύθυνσης ροής.



Σχήμα 3.11: Υδρογραφικό δίκτυο στην διανυσματική του μορφή της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Έπειτα, με χρήση της εντολής “Extract by Mask” από την εργαλειοθήκη του (ArcMap) έγινε περικοπή του DEM όλου του Νομού Καρδίτσας στα όρια της υπολεκάνης απορροής που επιλέχθηκε ανάντη του οικισμού του Μουζακίου. Η υπολεκάνη αυτή επιλέχθηκε καθώς είναι ευάλωτη σε πλημμυρικά φαινόμενα και κρίθηκε επιτακτική η μελέτη της.

3.3 Υδρολογική ανάλυση

3.3.1 Υετογράφημα σχεδιασμού

Αρχικά, η πρώτη μέθοδος υπολογισμού του υετογραφήματος σχεδιασμού είναι η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ. Η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ (Chow et al. 1988) είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία συνθετικών μοτίβων καταιγίδας, όπως συνίσταται από το εγχειρίδιο για τον έλεγχο σχεδιασμού πλημμύρας (DPWH-JICA 2003). Μέσω της μεθόδου αυτής, προκύπτει υετογράφημα συγκεκριμένης διάρκειας βροχής, περιόδου επαναφοράς από μια συγκεκριμένη όμβρια καμπύλη. Οι όμβριες καμπύλες υπολογίζονται στις περιπτώσεις τις οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον ισχυρές βροχοπτώσεις σε συγκεκριμένες περιοχές. Οι όμβριες καμπύλες εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της μέγιστης έντασης της

βροχόπτωσης i , συναρτήσει της χρονικής διάρκειας της καταιγίδας d και της περιόδου επαναφοράς T (Koutsoyiannis D., Kozonis D., & Manetas A., 1998). Οι καταγραφές που περιέχονται στις όμβριες καμπύλες είναι αποτελέσματα από επεισόδια βροχής που μετρήθηκαν με τη βοήθεια βροχογράφου. Ο χρόνος επαναφοράς ποικίλει ανάλογα το έργο. Για παράδειγμα ένα έργο οδοποιίας έχει 25 χρόνια περίοδο επαναφοράς, ενώ η κατασκευή ενός φράγματος 1000 χρόνια. Η διάρκεια βροχής εκτιμάται 2-4 φορές μεγαλύτερη του χρόνου συγκέντρωσης, ο οποίος προκύπτει με τη μέθοδο του Giandotti σύμφωνα με την Εξίσωση 3.1:

$$tc = \frac{1.5*L+4*\sqrt{A}}{0.8*\sqrt{\Delta H}} \quad (3.1)$$

Όπου tc ο χρόνος συγκέντρωσης (h), A η έκταση της λεκάνης (Km^2), L το μήκος της κύριας μισγάγκειας (km), ΔH η διαφορά του μέσου υψόμετρου της λεκάνης από το υψόμετρο της εξόδου της (m).

Το χρονικό βήμα της διάρκειας βροχής εξαρτάται από την έκταση της λεκάνης. Για μεγάλες λεκάνες πάνω από $200 Km^2$ επιλέγεται βήμα ανά μια ώρα, ενώ σε αρκετά μικρές λεκάνες συνίσταται η επιλογή χρονικού βήματος ανά μισή ώρα ή και ένα τέταρτο. Η ένταση της βροχόπτωσης προέκυψε από την ΓΑΤ (5 παραμέτρων) σύμφωνα με την Εξίσωση 3.2:

$$i = \frac{\lambda*(T^{\kappa}-\psi)}{(1+\frac{d}{\theta})^{\eta}} \quad (3.2)$$

Όπου i η ένταση βροχής ($\frac{mm}{h}$), T περίοδος επαναφοράς (y), d η διάρκεια βροχής (h), κ , λ , ψ , θ , η είναι σταθερές που προκύπτουν ανάλογα της όμβριας καμπύλης που χρησιμοποιήθηκε, οι οποίες αναζητήθηκαν μέσω του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας και την Ειδική Γραμματεία Υδάτων.

Επομένως, για την εύρεση των υψών βροχής μέσω της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ για βροχοπτώσεις κοινής περιόδου επαναφοράς χρησιμοποιείται η εξής Εξίσωση 3.3:

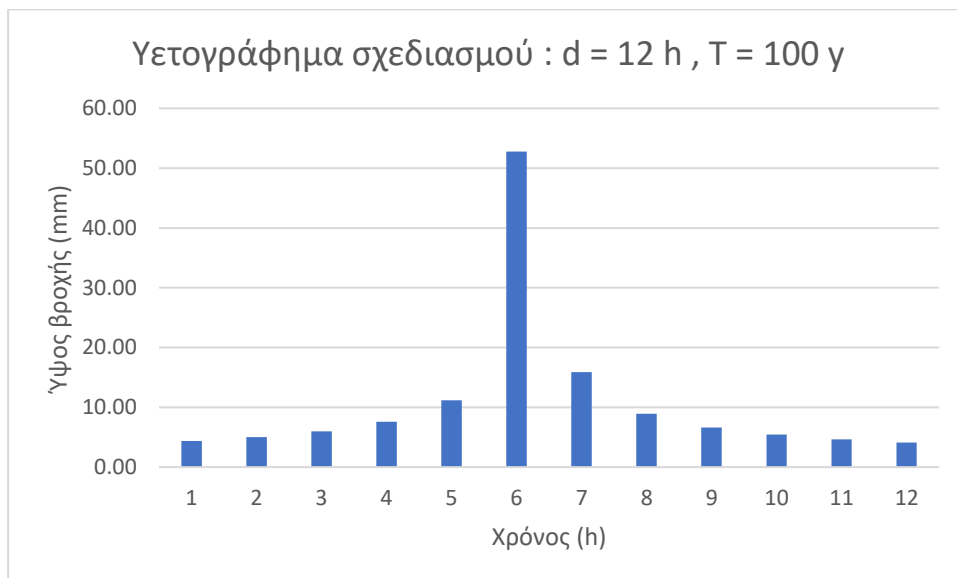
$$\frac{h1}{h2} = \left(\frac{t1}{t2}\right)^{1-\eta} \quad (3.3)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή προκύπτουν τα αθροιστικά ύψη βροχής ανά χρονικό βήμα διάρκειας βροχής. Έπειτα για τα ύψη κάθε χρονικού βήματος υπολογίζονται οι διαφορές τους. Αυτά αρχικά βρίσκονται σε φθίνουσα σειρά όπου έπειτα τοποθετούνται ώστε το μεγαλύτερο ύψος βροχής να βρίσκεται στο κεντρικό χρονικό διάστημα, στα δεξιά τοποθετείται το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα, μετά το αμέσως μικρότερο ύψος στο επόμενο χρονικό διάστημα από αριστερά κι συνεχίζεται αυτή η διαδικασία για όλη τη διάρκεια της βροχόπτωσης (Κουτσογιάννης 2010). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ είναι με διάρκεια βροχής περίπου 4 φορές του χρόνου συγκέντρωσης, για περίοδο επαναφοράς 100 έτη. Οι βασικές παράμετροι της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ παρουσιάζονται παρακάτω σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Βασικές παράμετροι της μεθόδου εναλλασσόμενων μπλοκ (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

tc (h)	3.45
d (h)	12
η	0.639
κ	0.038
λ	1328.5
ψ	0.882
θ	0.042
T (y)	100

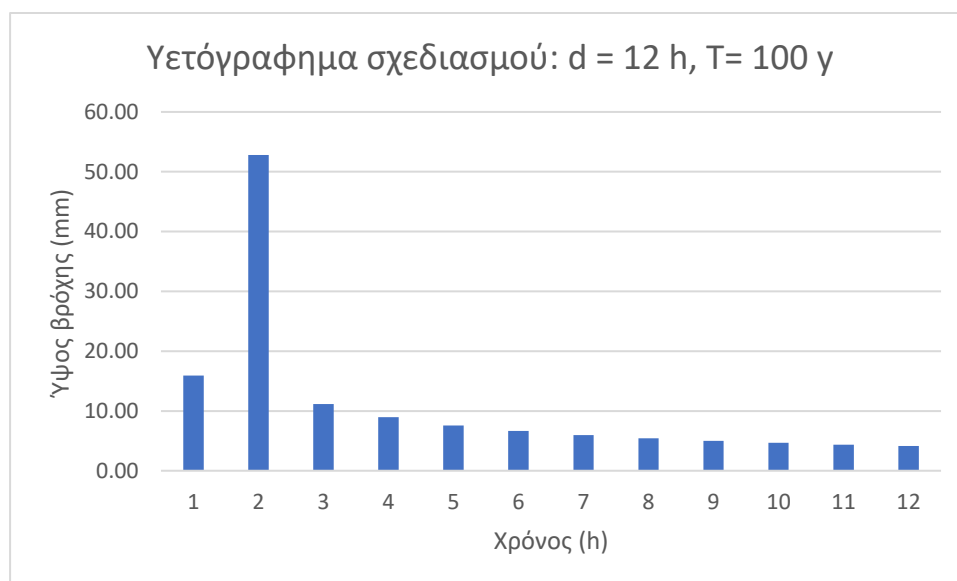
Το υετογράφημα της μεθόδου εναλλασσόμενων μπλοκ παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 3.12.



Σχήμα 3.12: Μέθοδος εναλλασσόμενων μπλοκ (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού του υετογραφήματος σχεδιασμού είναι αυτή της δυσμενέστερης διάταξης. Η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ με την διαφορά ότι το μεγαλύτερο ύψος βροχής τοποθετείται απέναντι από την μέγιστη τεταγμένη του μοναδιαίου υδρογραφήματος, το αμέσως μικρότερο απέναντι από την αμέσως μικρότερη τεταγμένη, κοκ (Κουτσογιάννης 2010). Χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέθοδος με κύριο σκοπό την διερεύνηση του χρόνου αιχμής του πλημμυρογραφήματός της όπου όπως προκύπτει και στην συνέχεια από τα αποτελέσματα είναι μικρότερος από την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ επομένως η μέθοδος αυτή είναι δυσμενέστερη ως προς τον χρόνο αιχμής. Η έρευνα του υετογραφήματος σχεδιασμού μ' αυτήν την μέθοδο γίνεται για λόγους σύγκρισης με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ και μόνο για την

μέθοδο του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη μέσω των ισόχρονων καμπυλών. Το υετογράφημα σχεδιασμού με την μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης απεικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.13:



Σχήμα 3.13: Μέθοδος δυσμενέστερης διάταξης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

3.3.2 Μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος

Ως υδρογράφημα ορίζεται η γραφική παράσταση της παροχής ως συνάρτηση του χρόνου σε μια συγκεκριμένη διατομή ενός ρεύματος.

Μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Sherman (1932), καλείται το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχόπτωση ύψους (10 mm) συγκεκριμένης διάρκειας η οποία είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σ' όλη την έκταση της λεκάνης κι έχει ομοιόμορφη ένταση.

Σύμφωνα με τους (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012) η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- 1) Σε μια συγκεκριμένη υδρολογική λεκάνη, βροχές ίσης διάρκειας που προκαλούν απορροή, δίνουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια περίπου χρονική βάση ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
- 2) Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες βροχές ή τις επόμενες.
- 3) Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις ισχύουν για φυσικές υδρολογικές λεκάνες κατά προσέγγιση (Wilson, 1990).

Η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος στηρίζεται σε δυο βασικές αρχές, την αρχή της αναλογίας και την αρχή της επαλληλίας (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012).

- **Αρχή αναλογίας:** Σύμφωνα με την αρχή της αναλογίας δύο ενεργές βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις δημιουργούν υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων.

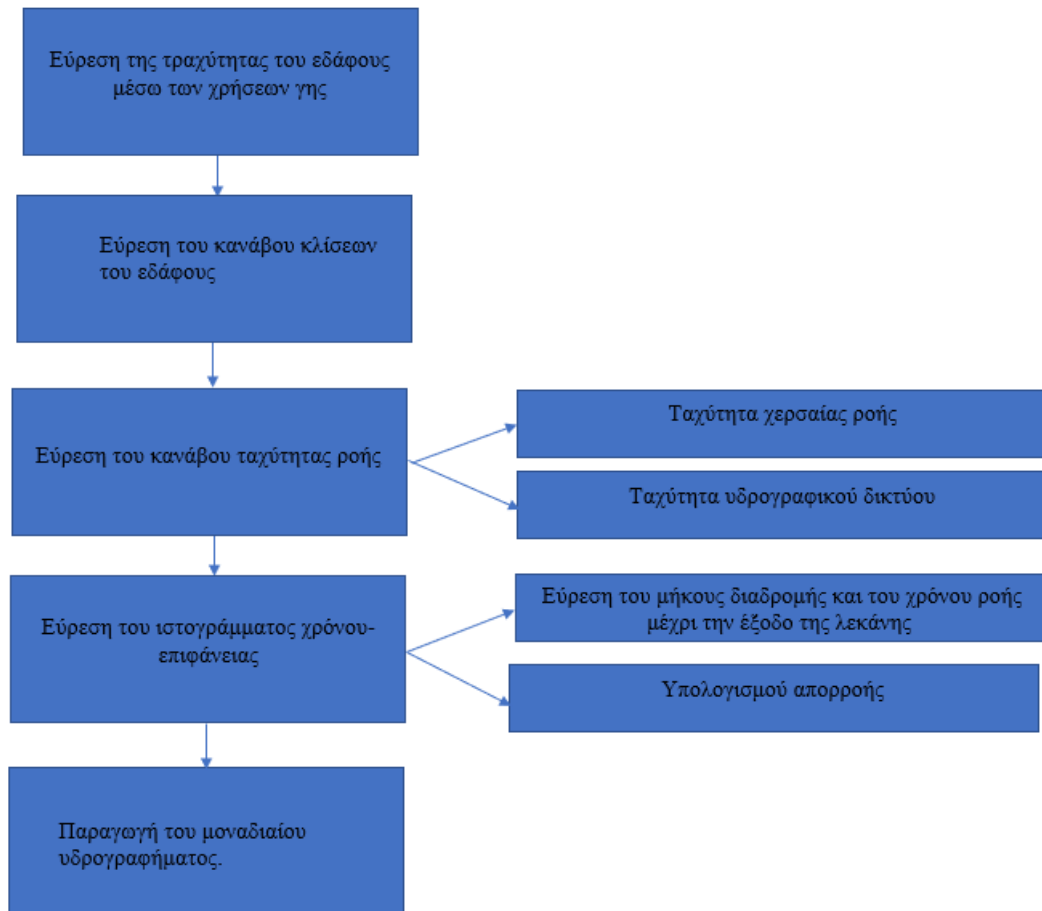
- **Αρχή επαλληλίας:** Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων.

3.3.3 Το μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών

Η μέθοδος χρόνου επιφάνειας είναι ουσιαστικά ένα ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας στο οποίο διακρίνεται η σχέση μεταξύ του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής η οποία συμβάλλει στην απορροή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (McCuern, 1989). Η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε υποπεριοχές με καμπύλες οι οποίες ονομάζονται ισόχρονες. Ειδικότερα, με τον όρο ισόχρονες καμπύλες καλείται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων όπου οι σταγόνες της βροχής που πέφτουν στην λεκάνη απέχουν το ίδιο χρονικά από το σημείο εξόδου της (Χριστοφίδης 2008). Σημειώνεται ότι οι ισόχρονες καμπύλες δεν τέμνονται μεταξύ τους και μπορούν να ξεκινούν και να τερματίζουν μόνο στα όρια της λεκάνης (Dooge, 1959).

Η εφαρμογή της μεθόδου χρόνου-επιφάνειας πραγματοποιείται μόνο σε μικρές ή μεσαίου μεγέθους λεκάνες επειδή δεν λαμβάνει υπόψη την αποθηκευτικότητα της λεκάνης. Επίσης σ' αυτή τη μέθοδο ισχύουν οι δυο αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος δηλαδή η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Αυτό σημαίνει ότι για τον υπολογισμό της πλημμυρικής απορροής εφαρμόζεται μια και μοναδική συνάρτηση ανεξάρτητη από τις μεταβολές της έντασης της ενεργού βροχόπτωσης (Sagjafian, Julien and Rajaie 2002).

Για την εύρεση των ισόχρονων καμπυλών ώστε να προκύψει το μοναδιαίο υδρογράφημα της υπολεκάνης που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε χρήση του λογισμικού ArcGIS. Τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου είναι το ΨΜΕ, η κατανομή του υδρογραφικού δικτύου σύμφωνα με τη γεωμορφολογική ανάλυση και ο χάρτης χρήσεων γης (Corine, 2018). Συνοπτικά, τα βήματα της μεθόδου συνοψίζονται στο παρακάτω Σχήμα 3.14:



Σχήμα 3.14: Διάγραμμα ροής ισόχρονων καμπυλών (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Αρχικά, για κάθε κατηγορία χρήσεων γης κατά Corine υπάρχει αντίστοιχα ο συντελεστής τραχύτητας εδάφους (k), σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 3.2. Οι τιμές αυτές του συντελεστή τραχύτητας μπαίνουν στο πρόγραμμα πολλαπλασιαζόμενες με το 100 ($k100$) ώστε να προκύψουν ακέραιες και να μην υπάρχει πρόβλημα με τη σύνταξη του λογισμικού στο αρχικό στάδιο των υπολογισμών, βέβαια αυτό διορθώνεται κι έπειτα στη διαδικασία. Το μέγεθος κάθε φατνίου επιλέγεται να συμπίπτει με αυτό του ΨΜΕ στην συγκεκριμένη περίπτωση 5m x 5 m.

Πίνακας 3.2: Συντελεστής τραχύτητας k100 για τις διάφορες κατηγορίες χρήσεων γης (Πηγή: Μπαλτάς 2020, Παρουσίαση στο μάθημα «Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά έργα»)

	k100	
1.1.1	Συνεχής αστικός ιστός	
1.1.2	Ασυνεχής αστικός ιστός	115
1.2.1	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	
1.2.2	Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	
1.2.3	Ζώνες λιμένων	115
1.2.4	Αεροδρόμια	
1.3.1	Χώροι εξορρέξεως οροκτών	
1.3.2	Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων	115
1.3.3	Χώροι οικοδόμησης	
1.4.1	Περιοχές αστικού πρασίνου	
1.4.2	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	60
2.1.1	Μη αρδεύομενη αρόσιμη γη	
2.1.2	Μόνιμα αρδεύομενη γη	50
2.1.3	Ορυζώνες	
2.2.1	Αμπελώνες	
2.2.2	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	19
2.2.3	Ελαιώνες	
2.3.1	Λιβάδια	43
2.4.1	Ετήσιες καλλιέργειες που σχετίζονται με μόνιμες καλλιέργειες	37
2.4.2	Σύνθετες καλλιέργειες	37
2.4.3	Γη που ρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	30
2.4.4	Γεωργο-δασικές περιοχές	25
3.1.1	Δάσος πλατύφυλλων	
3.1.2	Δάσος κωνοφόρων	15
3.1.3	Μικτό δάσος	
3.2.1	Φυσικοί βοσκότοποι	37
3.2.2	Θάμνοι και χερσότοποι	30
3.2.3	Σκληροφυλλική βλάστηση	30
3.2.4	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	25
3.3.1	Παραλίες, αμμόλογοι, αμμουδιές	60
3.3.2	Απογομνωμένοι βράχοι	43
3.3.3	Εκτάσεις με αραχή βλάστηση	55
3.3.4	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	60
3.3.5	Παγετώνες και αέναο χιόνι	149
4.1.1	Βάλτοι στην ενδοχώρα	37
4.1.2	Τυρφώνες	
4.2.1	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	
4.2.2	Αλοκές	37
4.2.3	Ζώνες που καλύπτονται από παλιροριακά ύδατα	
5.1.1	Υδατορεύματα	
5.1.2	Επιφάνειες στάσιμου ύδατος	30
5.2.1	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	
5.2.2	Εκβολές ποταμών	21
5.2.3	Θάλασσες και ωκεανοί	

Έπειτα, με τη χρήση του εργαλείου Slope του ArcGIS προκύπτει ο κλίση κλίσεων του εδάφους του ΨΜΕ ο οποίος είναι ιδιαίτερα χρήσιμος για την εύρεση της ταχύτητας ροής. Η ταχύτητα ροής χωρίζεται σε δυο κατηγορίες, τη χερσαία (overland flow) και την ποτάμια (overchannel flow). Η χερσαία ροή συνδέεται με την κάλυψη των χρήσεων γης και με την κλίση του εδάφους, ενώ η ποτάμια ταχύτητα ροής σε σχέση με τη χερσαία ταχύτητα ροής καθώς και την ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου (Ανδρικοπούλου 2021).

Επομένως, για κάθε εικονοστοιχείο προκύπτει η ταχύτητα χερσαίας ροής από την εξής Εξίσωση 3.4 (Μαμάσης 2007):

$$V\left(\frac{m}{s}\right) = k^* \sqrt{S\left(\frac{m}{m}\right)} \quad (3.4)$$

Όπου k ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους και S η κλίση του εδάφους.

Ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον ArcMap και συγκεκριμένα με τη χρήση του εργαλείου Raster Calculator, με το οποίο καθίσταται δυνατές αριθμητικές πράξεις μεταξύ αριθμών καθώς και ψηφιδωτών επιπέδων χωρικής πληροφορίας. Επομένως εκτελώντας την παραπάνω πράξη προκύπτει ο κানাβος ταχυτήτων χερσαίας ροής.

Για τη δημιουργία του κανάβου της ταχύτητας του υδρογραφικού δικτύου ακολουθείται η εξής διαδικασία. Αρχικά, κατασκευάζεται ο κানাβος διεύθυνσης ροής μέσω της εντολής Flow Direction στον οποίο διακρίνεται η κατεύθυνση κάθε εικονοστοιχείου σε σχέση με τα οκτώ γειτονικά του στοιχεία. Η κατεύθυνση που θα προκύψει θα είναι αυτή μεταξύ των ψηφίδων με τη μεγαλύτερη κλίση. Βάσει αυτού του κανάβου προκύπτει ο κানাβος της συγκέντρωσης ροής με την εντολή Flow Accumulation ο οποίος υπολογίζει για κάθε φατνίο πόσα απορρέουν μέσω αυτού. Η εντολή αυτή δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει ένα κατώφλι δηλαδή τον αριθμό των φατνίων από τον κানাβο συγκέντρωσης ροής ο οποίος αριθμός καθορίζει ποια φατνία αποτελούν υδρογραφικό δίκτυο. Ανάλογα με την τιμή του κατωφλιού δημιουργείται διαφορετικό υδρογραφικό δίκτυο. Αν είναι μεγάλη η τιμή του τότε σχηματίζεται αραιό υδρογραφικό δίκτυο, ενώ αν είναι μικρή πιο πυκνό.

Στην παρούσα εργασία, ορίστηκε εμβαδόν κατωφλιού ανάντη του υδρογραφικού δικτύου 2 Km^2 , το οποίο αντιστοιχεί σε 80000 ψηφίδες.

Στη συνέχεια, μετά τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου επιχειρείται η ιεράρχισή του σε τάξεις με την εντολή Stream Order εφαρμόζοντας τη μέθοδο Strahler. Σύμφωνα με τον (Strahler 1957), κλάδος 1^{ns} τάξης ορίζεται ο κλάδος του υδρογραφικού δικτύου ο οποίος δε δέχεται απορροή από αλλά μικρότερα υδατορεύματα. Ο κλάδος 2^{ns} τάξης προκύπτει από τη συμβολή δυο κλάδων 1^{ns} τάξης, από τη συμβολή δυο κλάδων 2^{ns} τάξης προκύπτει κλάδος 3^{ns} τάξης κ.ο.κ. Στην περίπτωση συμβολής δυο κλάδων διαφορετικής τάξης ο κλάδος που προκύπτει διατηρεί την αρίθμηση της μεγαλύτερης τάξης μεταξύ των συμβαλλόμενων δυο κλάδων.

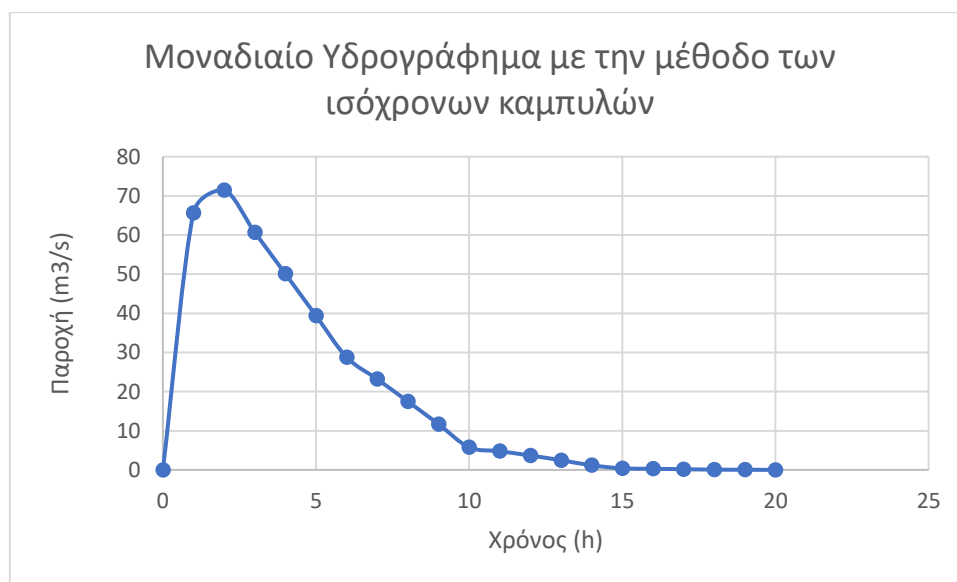
Ο κানাβος ιεράρχησης σε τάξεις υδρογραφικού δικτύου είναι ψηφιδωτής μορφής (raster) στον οποίο κάθε κλάδος απομονώνεται και αντιστοιχεί σ' αυτόν ένας αριθμός ο οποίος είναι η ταχύτητα ροής και η τιμή αυτή εξαρτάται από την τάξη που ανήκει ο εκάστοτε κλάδος. Στη συνέχεια, ενώνονται αυτοί οι επιμέρους ταξινομημένοι κλάδοι οι οποίοι έχουν διαφορετική ταχύτητα ροής ανάλογα την τάξη στην οποία ανήκουν μέσω του Raster Calculator και προκύπτει ο κানাβος ταχύτητας του υδρογραφικού δικτύου. Τέλος, η αθροιστική ταχύτητα ροής προκύπτει μέσω του Mosaic to New Raster επειδή τα δυο raster δεν έχουν κοινό τόπο σημείων και η πράξη δεν μπορεί να γίνει με το Raster Calculator .

Ακολουθεί ο υπολογισμός των συγκεντρωτικών χρόνων ροής, με τον οποίο βρίσκονται οι χρόνοι που χρειάζεται το νερό για κάθε ψηφίδα στην οποία εμπεριέχεται μέχρι να φτάσει στην έξοδο της λεκάνης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εντολής Flow Length η οποία δέχεται σαν δεδομένο την κατεύθυνση ροής και υπολογίζει το μήκος διαδρομής κάθε εικονοστοιχείου έως την έξοδο της λεκάνης. Για να μετατραπεί η απόσταση σε μονάδες χρόνου, εισάγεται στην εντολή αυτή μια παράμετρος ως βάρος το οποίο

αντιστοιχεί στο αντίστροφο της συνολικής ταχύτητας ροής. Με αυτό τον τρόπο οι αποστάσεις της κάθε ψηφίδας μέχρι την έξοδο της λεκάνης μετατρέπονται σε χρόνους. Έτσι δημιουργούνται οι ισόχρονες καμπύλες, οι οποίες εκφράζουν το γεωμετρικό τόπο των σημείων που απορρέουν τον ίδιο χρόνο από την έξοδο της λεκάνης.

Για τον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος το αποτέλεσμα ταξινομείται σε κλάσεις τις οποίες επιλέγει ο εκάστοτε χρήστης. Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε ανά μια ώρα με τη βοήθεια της εντολής Reclassify. Για τον υπολογισμό της παροχής ανά κλάση δηλαδή ανά μια ώρα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, έγινε πολλαπλασιασμός του Μοναδιαίου ύψους βροχής (10 mm) με τις διαστάσεις της κάθε ψηφίδας (5 m x 5 m) και στη συνέχεια με το πλήθος των εικονοστοιχείων που απορρέουν ανά κλάση, δηλαδή κάθε μια ώρα.

Στην συνέχεια σε ένα υπολογιστικό φύλλο στο Excel, έγιναν κάποιες τροποποιήσεις ώστε να διορθωθεί η μορφή του μοναδιαίου υδρογραφήματος και να μην κάνει πολλές γωνίες σύμφωνα με το Σχήμα 3.15. Η διαδικασία απαιτεί η μέγιστη παροχή και ο χρόνος αιχμής να παραμείνουν αμετάβλητοι. Πραγματοποιήθηκαν αλλαγές σε κάποιες κλάσεις όχι απαραίτητα σε όλες κυρίως σ' αυτές που δημιουργούσαν τις γωνίες στο μοναδιαίο υδρογράφημα δηλαδή αυξομείωση των συνολικών ψηφίδων που απορρέουν σε αυτές τις κλάσεις και κατά συνέπεια και στις παροχές των κλάσεων αυτών. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο συνολικός αριθμός των ψηφίδων που απορρέουν σε κάθε κλάση να είναι ίδιος πριν και μετά από αυτές τις τροποποιήσεις. Επίσης, η σταδιακή αύξηση των παροχών ανά κλάση μέχρι τη μέγιστη τιμή της παροχής και μετά η μείωση των παροχών μέχρι το τέλος της διάρκειας του μοναδιαίου υδρογραφήματος.



Σχήμα 3.15: Μοναδιαίο υδρογράφημα με την μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών
(Πηγή: ίδια επεξεργασία)

3.3.4 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder

Τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα εφαρμόζονται σε περιοχές τις οποίες δεν υπάρχουν μετρήσεις. Αυτές οι μέθοδοι είναι εμπειρικές όπου σημαντικό ρόλο παίζει η ρύθμιση των παραμέτρων στις σχέσεις υπολογισμού της αιχμής και του χρόνου διάρκειας μεταξύ του κέντρου βάρους της βροχής και της αιχμής. Η μέθοδος Snyder Synthetic Unit Hydrograph είναι από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους κατασκευής σύνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, όπου προέκυψε από αναλύσεις μεγάλου αριθμού βροχοπτώσεων στην περιοχή των Απαλλαχίων, στην Βόρεια Αμερική (Μιμίκου και Μπαλτάς 2012).

Με τη μέθοδο αυτή, υπολογίζεται ο χρόνος υστέρησης t_p , η αιχμή Q_p , ο χρόνος βάσης T , όπως επίσης και τα πλάτη του ΜΥΓ W50 και W75 σε χρόνο που αντιστοιχεί στο 50% και 75% της αιχμής (McCuen, 1998).

Οι Εξισώσεις 3.5, 3.6 και 3.7 που προκύπτουν με βάση αυτή την μέθοδο είναι:

$$t_p = 0.75 * C_t * (Lca * L)^{0.3} \text{ (h)} \quad (3.5)$$

$$Q_p = C_p * \frac{2.75 * A}{t_p} \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (3.6)$$

$$T = 3 + 3 * \left(\frac{t_p}{24}\right) \text{ (d)} \quad (3.7)$$

Όπου:

Lca : Η απόσταση του παροχομετρικού σταθμού στην έξοδο της λεκάνης από το κέντρο βάρους της λεκάνης, το οποίο μετρείται κατά μήκος της κοίτης του κύριου υδατορεύματος ως το πλησιέστερο σημείο του κέντρου βάρους (km).

L : Η απόσταση του σταθμού μέτρησης παροχής ως τον υδροκρίτη, που μετρείται κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος (km).

C_t : Συντελεστής αδιάστατος ο οποίος αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης με τις τιμές του να κυμαίνονται από 1.8-2.2. Για μεγάλων κλίσεων λεκάνες η τιμή του τείνει στη χαμηλότερη δυνατή.

C_p : Συντελεστής αδιάστατος, ο οποίος εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης με τις τιμές του να κυμαίνονται από 0.56-0.69.

A : Η έκταση της λεκάνης (km^2)

T : Ο χρόνος βάσης του υδρογραφήματος (d). Η παραπάνω εξίσωση δίνει ελάχιστη τιμή ίση με 3 ημέρες.

Ο χρόνος υστέρησης υπολογίζεται από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης μέχρι την αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Η διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης t_R , συνδέεται με τη χρονική υστέρηση με την Εξίσωση 3.8:

$$t_R = \frac{t_p}{5.5} \quad (3.8)$$

Στην περίπτωση όπου το ζητούμενο ΜΥΓ έχει διάρκεια tR' η οποία είναι μεγαλύτερη της tR , ο χρόνος υστέρησης υπολογίζεται με την Εξίσωση 3.9:

$$tp' = tp + \frac{(tR' - tR)}{4} \quad (3.9)$$

Επομένως στην περίπτωση αυτή, με βάση την νέα τιμή του χρόνου υστέρησης γίνεται αντικατάσταση των σχέσεων για να υπολογιστούν οι νέες διορθωμένες τιμές των Qp' και T' .

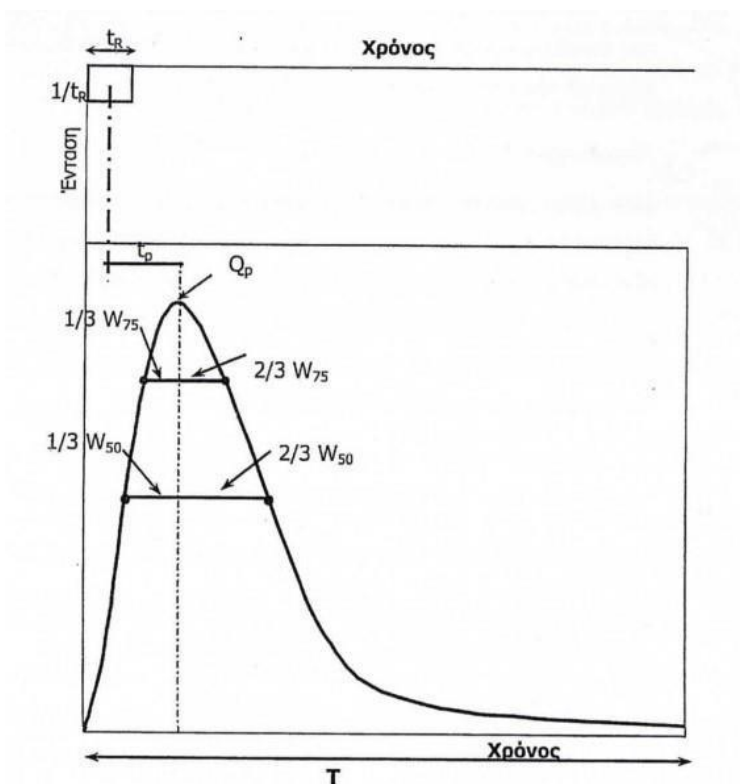
Ο υπολογισμός των πλατών του ΜΥΓ στο 50% και 75% της αιχμής πραγματοποιείται με τις ακόλουθες Εξισώσεις 3.10 και 3.11 :

$$W50 = \frac{830}{qp^{1.1}} \quad (3.10)$$

$$W75 = \frac{470}{qp^{1.1}} \quad (3.11)$$

Όπου $qp = \frac{Qp}{A}$ η παροχή αιχμής ανηγμένη στην επιφάνεια της λεκάνης Α.

Με βάση τους υπολογισμούς αυτούς, υπολογίζονται 7 σημεία του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος μεταξύ αυτών η αρχή και το τέλος του και με αυτά τα 7 σημεία γίνεται ο σχεδιασμός του σύμφωνα με το Σχήμα 3.16.



Σχήμα 3.16: συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder (Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτας 2012).

3.3.5 Εκτίμηση υδρολογικών απωλειών με την μέθοδο SCS CN

Η εκτίμηση των απωλειών βροχής είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη στις προσομοιώσεις του κάθε μελετητή. Οι απώλειες αυτές, οφείλονται στο τμήμα της βροχής που στην αρχή κατακρατείται στο έδαφος και στη συνέχεια, είτε διηθείται στο έδαφος είτε εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα. Το υπόλοιπο τμήμα της βροχής μετατρέπεται σε απορροή και ονομάζεται ενεργός βροχόπτωση.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, χρησιμοποιήθηκε μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους παγκοσμίως, η εμπειρική μέθοδος SCS. Η μέθοδος αυτή, αναπτύχθηκε από την Αμερικάνικη υπηρεσία Soil Conservation Service η οποία ονομάζεται πλέον Natural Resources Conservation Service με την οποία υπολογίζεται ο αριθμός καμπύλης CN. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή υπολογίζει το ύψος και κατά συνέπεια τον όγκο τους περισσεύματος της βροχής βάση τριών μεταβλητών: του ύψους βροχής, τα αρχικά ελλείματα και τον συνδυασμό φυτοκάλυψης και γεωλογικών χαρακτηριστικών του εδάφους σύμφωνα με το ΥΠΕΝ. Ο αριθμός καμπύλης CN είναι αδιάστατος αριθμός με εύρος τιμών από 0 έως και 100. Μικρές τιμές υποδηλώνουν διαπερατό έδαφος, ενώ μεγάλες αδιαπέρατο.

Για την εύρεση της ενεργού βροχόπτωσης χρησιμοποιούνται οι Εξισώσεις 3.12 και 3.13:

$$he = 0, h \leq hao \quad (3.12)$$

$$he = \frac{(h-0.2*S)^2}{h+0.8*S}, h > hao \quad (3.13)$$

Όπου he είναι το ενεργό ύψος της βροχής (mm), h το συνολικό ύψος της βροχής (mm), hao του αρχικού ελλείματος το ύψος (mm) και S η μέγιστη δυνητική κατακράτηση (mm).

Σύμφωνα με την SCS, εκτιμάται ότι οι αρχικές απώλειες αποτελούν το 20% των ολικών απωλειών, σύμφωνα με την Εξίσωση 3.14:

$$hao = 0.2*S \quad (3.14)$$

Η μέγιστη δυνητική κατακράτηση S (mm), εξαρτάται από τον αριθμό καμπύλης CN σύμφωνα με την Εξίσωση 3.15:

$$S = 254 * \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.15)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο SCS το έδαφος χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα του πόσο διαπερατό είναι (Μιμίκου και Μπαλτάς 2012):

Κατηγορία Α: Έδαφος με μεγάλη διηθητικότητα ακόμα και αν διαβραχούν διεξοδικά. Κατά βάση πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια.

Κατηγορία Β: Έδαφος με μέτρια διηθητικότητα, (π.χ αμμώδης πηλός).

Κατηγορία C: Έδαφος με χαμηλή διηθητικότητα, όπως εδάφη με μεγάλο ποσοστό αργίλου.

Κατηγορία D: Εδάφη με πολύ μικρή διηθητικότητα. Τέτοια εδάφη είναι τα αργιλώδη με μεγάλη πιθανότητα διόγκωσης ή ρηχά εδάφη τα οποία είναι πάνω σε σχεδόν αδιαπέρατο υλικό.

Σύμφωνα με τις οδηγίες του ΥΠΕΝ, η κατηγοριοποίηση των εδαφών στην Ελλάδα είναι η εξής με βάση τον Πίνακα 3.3:

Πίνακας 3.3: Υδρολογικοί τύποι πετρωμάτων στην Ελλάδα (Πηγή: https://floods.ypeka.gr/egyfloods/reports/Ipologismos_CN.pdf)

Πέτρωμα	Υφή	Υδρολογικός Τύπος
Α. Πλουτώνια πετρώματα		
Γρανίτης	Αμμώδη έως πηλώδη	A
Συηνίτης	Βαρύτερα του Γρανίτη	B
Διορίτης	Αργιλώδη ή αργιλοπηλώδη	D
Γάββρος και Περιδοίτης	Πηλώδη μέχρι αργιλώδη	B, C, D
Β. Εκρηξιγενή		
Διαβάσης	Αργιλώδη	D
Οφείτης	Λεπτή ή μέτρια λεπτή υφή	C, D
Ρυόλιθος	Αμμώδη	A
Τραχείτης	Αμμώδη	A
Ανδρείτης	Αργιλώδη	D
Βασάλτης	Αργιλώδη	D
Γ. Μηχανικά ιζηματογενή		
Αμμόλιθοι και ψαμίτες	Αμμώδη έως αμμοπηλώδη	A
Κροκαλοπαγή, λατυποπαγή	Αμμοπηλώδη	A
Σχιστή άργιλος, αργιλίτες	Αργιλώδη	D
Φλύσης Αδριατικοϊόνιας ζώνης	Αμμοαργιλώδη έως Αργιλώδη	D
Ωλονού-Πίνδου		
Φλύσης Πίνδου	Ελαφρύτερα της προηγούμενης	B
Φλύσης Τριπόλεως-Γαβρόβου	Ενδιάμεση υφή μεταξύ των δυο προηγούμενων.	C
Δ. Χημικά και βιογενή ιζηματογενή		
Σκληροί Ασβεστόλιθοι	Αργιλοπηλώδη έως αργιλώδη	D
Ασβεστολιθικές μάργες	Πηλώδη έως Αργιλοπηλώδη	C
Ε. Μεταμορφωσιγενή		
Γνεύσιος	Αμμοπηλώδη έως πηλώδη	A, B
Σχιστόλιθος (μαρμαρυγιακός)	Αμμοπηλώδη	A
Σχιστόλιθος (σερικιτικός)	Αμμώδη έως πηλοαμμώδη	A
Σχιστόλιθος (χλωριτικός)	Βαρύτερα από τα τρία παραπάνω	B
Αργιλικός σχιστόλιθος ή σχίστης	Βαριά εδάφη	D
Χαλαζίτης	Αμμώδη	A

Έπειτα, λαμβάνεται υπόψιν η φυτοκάλυψη σε συνδυασμό με τον τύπο πετρωμάτων που ορίστηκαν προηγουμένως για κάθε κωδικό και προκύπτουν οι εξής τιμές αριθμού καμπύλης απορροής με βάση τον Πίνακα 3.4:

Πίνακας 3.4: Τιμές αριθμού καμπύλης απορροής , CN , σε σχέση με την κατηγοριοποίηση των εδαφών και την φυτοκάλυψη (https://floods.ypeka.gr/egyFloods/gr03/Report/EL03_P04_T1.pdf)

Κωδικός CORINE	Κωδικός SC	Περιγραφή	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
			A	B	C	D
111	720	Συνεχής αστική οικοδόμηση	69	80	87	90
112	770	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	66	77	83	86
121	100	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	85	90	93	94
122	100	Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	87	92	94	95
123	100	Ζώνες λιμένων	85	90	93	94
124	100	Αεροδρόμια	85	90	93	94
131	200	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	69	80	87	90
133	200	Χώροι οικοδόμησης	69	80	87	90
141	630	Περιοχές αστικού πράσινου	44	65	62	82
142	200	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	50	70	80	85
211	320	Μη αρδύσιμη αρόσιμη γη	67	76	83	86
212	330	Μόνιμα αρδευόμενη γη	67	76	83	86
213	100	Ορυζώνες	59	72	81	85
221	310	Αμπελώνες	63	72	79	82
222	500	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	44	66	77	83
223	500	Ελαιώνες	49	59	72	82
231	400	Λιβάδια	54	70	80	85
241	500	Ετήσιες καλλιέργειες που συνδέονται με μόνιμες καλλιέργειες	67	76	83	86
242	320	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	67	76	83	86
243	320	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	67	76	83	86
311	665	Δάσος πλατυφύλλων	35	61	74	80
312	665	Δάσος κωνοφόρων	35	61	74	80
313	665	Μικτό δάσος	35	61	74	80
321	400	Φυσικοί βοσκότοποι	49	69	79	84
322	400	Θάμνοι και χερσότοποι	42	62	74	80
323	400	Σκληροφυλλική βλάστηση	42	62	74	80
324	630	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	42	62	74	80
331	200	Παραλίες αμμόλοφοι αμμουδιές	42	62	74	80
332	200	Απογυμνωμένοι βράχοι	76	86	90	92
333	200	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	42	62	74	80
411	100	Βάλτοι στην ενδοχώρα	95	95	95	95
421	100	Παραθαλάσσιοι βάλτοι	95	95	95	95
422	100	Αλυκές	95	95	95	95
511	100	Ροές υδάτων	100	100	100	100
512	100	Συλλογές υδάτων	100	100	100	100
521	100	Παράκτιες λιμνοθάλασσες	100	100	100	100
523	100	Θάλασσα και ωκεανός	100	100	100	100

Τέλος, ανάλογα με τις προηγούμενες συνθήκες υγρασίας, το έδαφος χωρίζεται σε τρεις καταστάσεις (Μιμίκου και Μπαλτάς 2012):

Κατάσταση I: Σ' αυτή την κατάσταση τα εδάφη είναι στεγνά, αλλά όχι όμως σε σημείο μόνιμης μάρανσης και όταν λαμβάνει χώρα ικανή άροση ή καλλιέργεια.

Κατάσταση II: Αυτή η κατάσταση αφορά μια μέση περίπτωση για ετήσιες πλημμύρες, δηλαδή έναν μέσο όρο των συνθηκών που είχαν προηγηθεί της μέγιστης ετήσιας πλημμύρας σε πολλές λεκάνες απορροής.

Κατάσταση III: Ισχύει αυτή η κατάσταση στην περίπτωση που τις τελευταίες πέντε ημέρες πριν την καταιγίδα υπήρξε μεγάλη βροχόπτωση ή ελαφρά με χαμηλές θερμοκρασίες και το έδαφος ήταν σχεδόν κορεσμένο.

Επομένως, οι Εξισώσεις 3.16 , 3.17 και 3.18 αποτελούν εξισώσεις υπολογισμού του αριθμού καμπύλης CN ανάλογα με τις συνθήκες υγρασίας του εδάφους και είναι οι ακόλουθες:

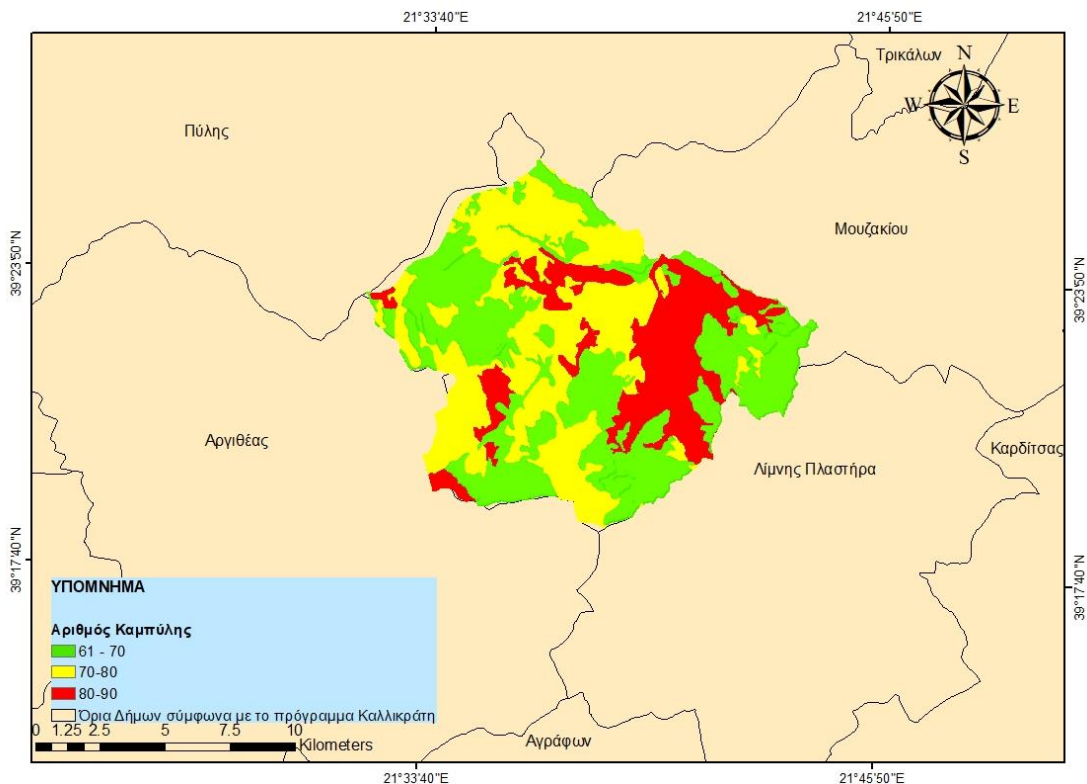
$$CNI = \frac{0.42 * CNII}{1 - 0.0058 * CNII} \quad (3.16)$$

$$CNII = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{A} * CNi \right) \quad (3.17)$$

Όπου A_i το εμβαδόν της υποπεριοχής i , A το εμβαδόν ολόκληρης της λεκάνης και CNi ο αριθμός καμπύλης απορροής της υποπεριοχής i .

$$CNIII = \frac{2.3 * CNII}{1 + 0.013 * CNII} \quad (3.18)$$

Ο χάρτης του αριθμού καμπύλης CN για κατηγορία II εφαρμόζοντας την παραπάνω μεθοδολογία είναι ο εξής με βάση το Σχήμα 3.17:

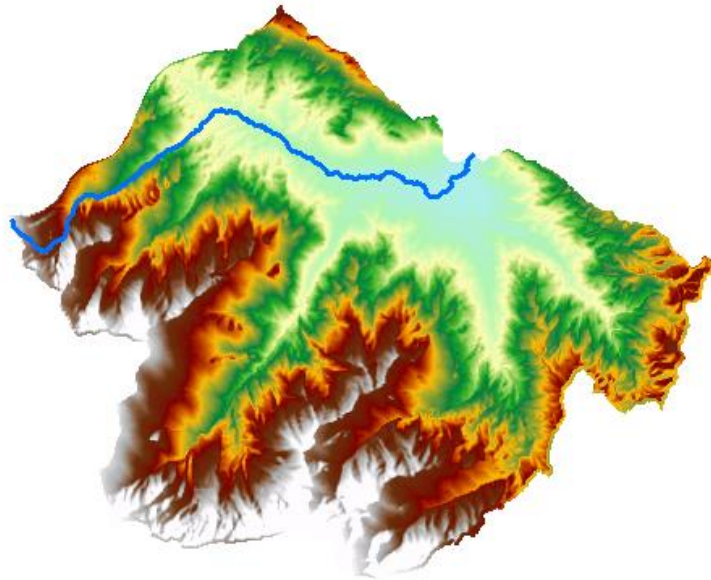


Σχήμα 3.17: Αριθμός καμπύλης για την περιοχή μελέτης (Πηγή : ίδια επεξεργασία)

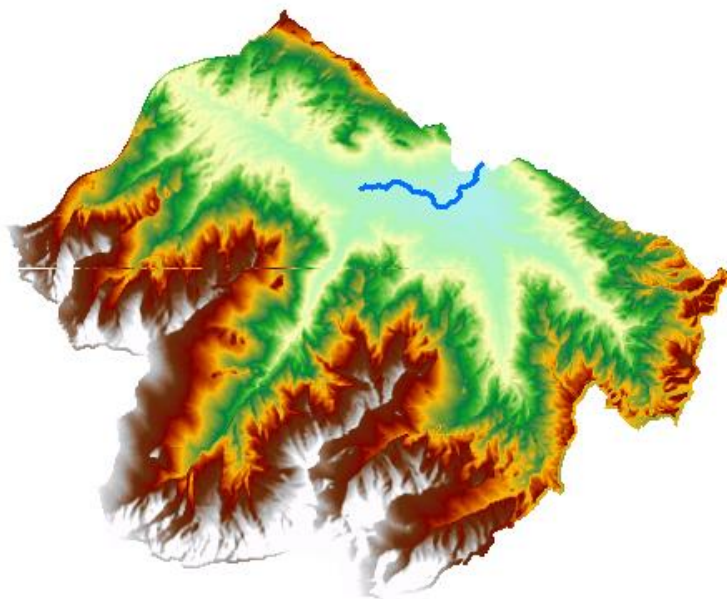
3.3.6 Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών της υπολεκάνης μελέτης

Μέσω του μενού Basin Characteristics του HEC-GeoHMS, υπολογίστηκαν κάποια τοπογραφικά χαρακτηριστικά της υπολεκάνης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο λογισμικό HEC-HMS. Υπολογίστηκε, σύμφωνα με το Σχήμα 3.18 το μέγιστο μήκος υδατορεύματος της λεκάνης μέχρι την έξοδό της στα 16.91 km με την εντολή Longest Flow Path Length, η απόσταση από την έξοδο της περιοχής μελέτης ως το πλησιέστερο σημείο κατά μήκος του υδατορεύματος στο κέντρο βάρους της λεκάνης στα 4.07 km σύμφωνα με το Σχήμα 3.19. Το μήκος αυτό προέκυψε με δύο βήματα: 1) με την εντολή Basin Centroid πού προκύπτει το κέντρο βάρους της λεκάνης

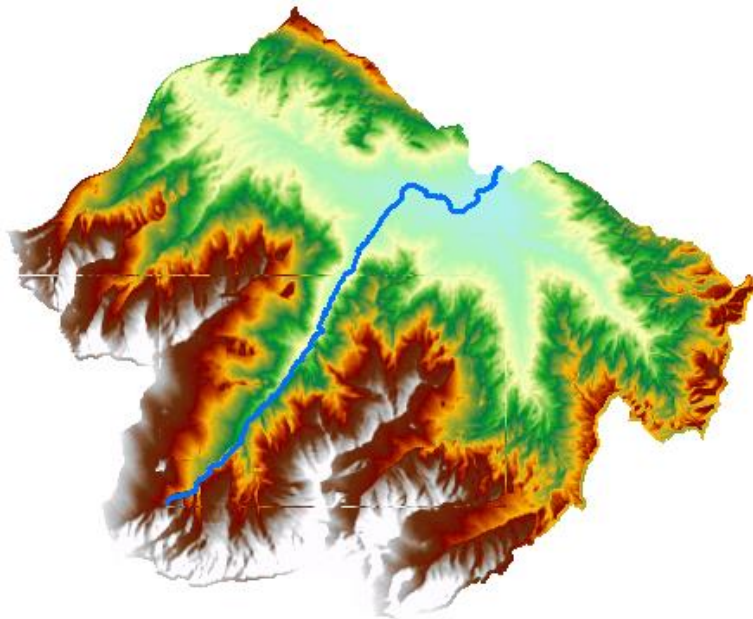
και 2) με την εντολή Centroidal Longest Flow Path προκύπτει το τελικό αποτέλεσμα. Σημαντικό επίσης τοπογραφικό χαρακτηριστικό είναι το μήκος του κύριου υδατορεύματος που προκύπτει 14.09 km όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.20. Η χάραξη του ξεκινά από την έξοδο της υπολεκάνης μελέτης και ακολουθεί το ρεύμα μεγαλύτερης τάξης έως την μικρότερη τάξη του υδατορεύματος. Στην περίπτωση ίδιας τάξης υδατορεύματος επιλέγεται η μεγαλύτερη διαδρομή της τάξης αυτής. Τα αποτελέσματα των τοπογραφικών χαρακτηριστικών διακρίνονται στα παρακάτω σχήματα σε περιβάλλον GIS.



Σχήμα 3.18: Μέγιστο μήκος υδατορεύματος της λεκάνης μέχρι την έξοδό της.
(Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 3.19: Απόσταση από την έξοδο της περιοχής μελέτης ως το πλησιέστερο σημείο κατά μήκος του υδατορεύματος στο κέντρο βάρους της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 3.20: Μήκος κύριου υδατορεύματος (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

3.3.7 Υδρολογική ανάλυση μέσω του λογισμικού HEC-HMS

Η τυχαιότητα και η πολυπλοκότητα που εμπεριέχεται στις υδρολογικές μεταβλητές, όπως και η δυσκολία για καταγραφή δεδομένων παροχής είχαν ως αποτέλεσμα την κατασκευή μοντέλων για τη βέλτιστη δυνατή προσομοίωση της βροχής καθώς και τον υπολογισμό των παροχών. Τα μοντέλα αυτά, αξιοποιούν μαθηματικές εξισώσεις με σκοπό την επιτυχή μετατροπή της βροχής σε απορροή (Τσακίρης, 2013). Τα υδρολογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται συνήθως για την απόκτηση γνώσεων σχετικά με την υδρολογία των λεκανών απορροής και την πρόβλεψη μελλοντικών αλλαγών (Tiel, Stahl and Freudiger 2020). Με τον όρο υδρολογικό μοντέλο γίνεται αναφορά σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς, με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που ενδιαφέρουν σε πρακτικές εφαρμογές (Ευστρατιάδης, Ρόζος και Κουκουβίνος 2009). Τα υδρολογικά μοντέλα συνδυάζουν πολλά επί μέρους θεματικά επίπεδα όπως τοπογραφικά, γεωμορφολογικά, εδαφολογικά και επίπεδα χρήσεων γης όπου για την κατάλληλη διαχείρισή τους απαιτούνται συγκεκριμένα και διαφόρων ειδών λογισμικά.

Ένα από τα πιο διαδεδομένα υδρολογικά μοντέλα παγκοσμίως είναι το HEC-HMS. Πρόκειται για ένα προσδιοριστικό μοντέλο, όπου στηρίζεται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος με σκοπό την μετατροπή της βροχής σε απορροή. Δημιουργήθηκε από το σώμα μηχανικών του Αμερικάνικου στρατού (U.S Army Corps of Engineers-U.S.A.C.E) ώστε να προσομοιώνει τις διαδικασίες βροχής-απορροής σε δενδριτικό σύστημα λεκανών. Επίσης, η εφαρμογή του είναι ικανή τόσο για μεγάλες λεκάνες απορροής όσο και για μικρές αστικές λεκάνες. Είναι ικανό για την επίλυση ποικίλων εφαρμογών όπως την ανάλυση επεισοδίων βροχής, τη μελέτη υδατικών συστημάτων και την ανάλυση μεταφοράς φερτών. Τα παραγόμενα

πλημμυρογραφήματα του λογισμικού συνδέονται και με άλλα λογισμικά για την πραγματοποίηση μελετών: διαθεσιμότητας υδάτων, προγνώσεων πλημμυρών, σχεδιασμού υπερχειλιστή φραγμάτων, αστικών αποχετεύσεων, διευθέτησης πλημμύρας κ.α (Feldman 2000).

Το λογισμικό αυτό δίνει τη δυνατότητα για κάθε υδρολογική συνιστώσα να υπάρχει μια γκάμα μαθηματικών μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά είναι ικανά να περιγράψουν (Μαμάσης 2009):

- Μεμονωμένα υδρολογικά γεγονότα δηλαδή σε χρονική διάρκεια επεισοδίου βροχής.
- Συνεχή τα οποία παράγουν αποτελέσματα σε συνεχή χρόνο.

Επιπρόσθετα, χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα:

Το πεδίο εφαρμογή τους

- Μελέτη λεκάνης απορροής
- Μελέτη υδροφορέα
- Μελέτη επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών

Τη γεωγραφική τους περιγραφή

- Συγκεντρωμένο: Η λεκάνη απορροής είναι μια κι ενιαία με ενιαίες φορτίσεις και παραμέτρους.
- Κατανεμημένο: Η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε υπολεκάνες με διαφορετικές φορτίσεις και παραμέτρους ανά υπολεκάνη.
- Ημιαδιαμέριστα: Κοινές παράμετροι ανά λεκάνη αλλά διαφορετικές φορτίσεις.
- Κατανεμημένα: Η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε πολύ μικρές υπολεκάνες.

Τη Μαθηματική τους περιγραφή

- Προσδιοριστικά: Οι μεταβλητές δεν έχουν στοχαστική δομή.
- Στοχαστικά: Οι μεταβλητές έχουν στατιστικά χαρακτηριστικά.
- Εννοιολογικά: Το φυσικό σύστημα προσομοιώνεται με απλουστευμένες παραδοχές.
- Φυσικά: Στο φυσικό σύστημα γίνεται προσομοίωση βάση μαθηματικών και φυσικών εξισώσεων.
- Μαύρου κουτιού: Εισέρχονται κάποια δεδομένα εισόδου και παράγονται κάποια εξόδου χωρίς κάποια φυσική συνέπεια.

Τη Χρονική τους διακριτότητα

- Μικρής κλίμακας: Για μοντέλα προσομοίωσης πλημμυρών για ημερησία το πολύ χρονική διακριτότητα.
- Μεγάλης κλίμακας: Για μοντέλα προσομοίωσης διαχείρισης υδατικών πόρων έχουν χρονική διακριτότητα μηνιαία και λίγες φορές ημερήσια.

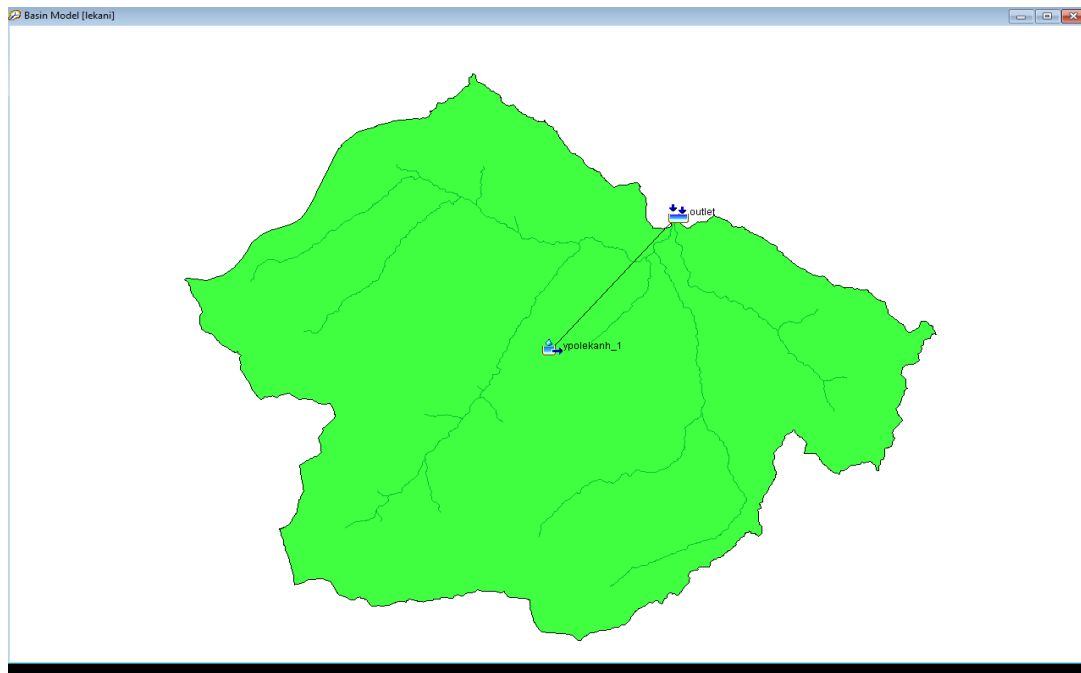
Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS είναι ένα εύχρηστο λογισμικό το οποίο για κάθε μέρος του υδρολογικού κύκλου υπάρχει πληθώρα μαθηματικών μοντέλων ώστε ο κάθε χρήστης να κάνει τις κατάλληλες επιλογές ανάλογα την εκάστοτε μελέτη του. Για την επιτυχή μοντελοποίηση του φυσικού συστήματος παίζουν ρόλο κι άλλες παράμετροι όπως η εμπειρία και οι γνώσεις του χρήστη καθώς και το είδος και η ποσότητα των δεδομένων που κατέχει (Schafferberg and Flemming, 2010).

Το HEC-HMS για την εφαρμογή των υδρολογικών παραμέτρων παρέχει:

- Μοντέλο λεκάνης απορροής
- Μετεωρολογικό μοντέλο
- Χρονοσειρές βροχόπτωσης
- Καθορισμός χρονικής διάρκειας προσομοίωσης

Μοντέλο Λεκάνης Απορροής

Αρχικά, έγινε θεώρηση συγκεντρωμένου μοντέλου λεκάνης απορροής. Επομένως, εισήχθη στο μοντέλο λεκάνης απορροής η υπολεκάνη, η έξοδος της περιοχής μελέτης καθώς και το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής. Τα στοιχεία αυτά, υπολογίστηκαν με βάση το λογισμικό ArcGIS καθώς και με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης HEC-GeoHms. Έπειτα, συμπληρώθηκε υποχρεωτικά το εμβαδόν της υπολεκάνης και έγινε επιλογή της μεθόδου για τη μετατροπή της βροχής σε απορροή (Transform method). Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε με δυο διαφορετικές μεθόδους: τη μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder και με τη μέθοδο του Ορισμένου Μοναδίου Υδρογραφήματος από το Χρήστη, το οποίο υπολογίστηκε με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών. Κάθε μέθοδος αναλύεται αναλυτικά σε άλλο υποκεφάλαιο. Στη συνέχεια, για την εύρεση των απωλειών υπάρχουν αρκετές μέθοδοι στο tab (Loss method). Και στις δυο περιπτώσεις εφαρμόστηκε η μέθοδος SCS CN με αριθμό καμπύλης CN 72. Σημαντικό είναι στο tab (Downstream) να επιλεγθεί η έξοδος της υπολεκάνης ώστε να γίνει σύνδεση της υπολεκάνης με την έξοδό της. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η απεικόνιση της λεκάνης απορροής, η έξοδος της, καθώς και το υδρογραφικό της δίκτυο είναι προαιρετικά για την εκτέλεση του προγράμματος και δεν προσδιορίζουν γεωγραφικές θέσεις δηλαδή η μετακίνησή τους δεν επηρεάζει κάποιο αποτέλεσμα. Ο λόγος της απεικόνισής τους είναι καθαρά εποπτικός με βάση το Σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.21: Μοντέλο λεκάνης απορροής στο περιβάλλον HEC-HMS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Μετεωρολογικό Μοντέλο

Στη συνέχεια, στο μετεωρολογικό μοντέλο, για τον υπολογισμό της βροχόπτωσης έγινε χρήση των δεδομένων των βροχομετρικών σταθμών καθώς και του βάρους καθενός απ' αυτούς (gauge weights). Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, υπήρξε μια όμβρια καμπύλη που ονομάζεται Δρακότρυπα επομένως λαμβάνει το συνολικό βάρος που ισούται με τη μονάδα. Η δημιουργία του μετεωρολογικού μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.22.

Met Name: Met 1

Description:

Unit System: Metric

Shortwave: --None--

Longwave: --None--

Precipitation: Gage Weights

Evapotranspiration: --None--

Snowmelt: --None--

Replace Missing: Abort Compute

Element Name: ypolekanh_1

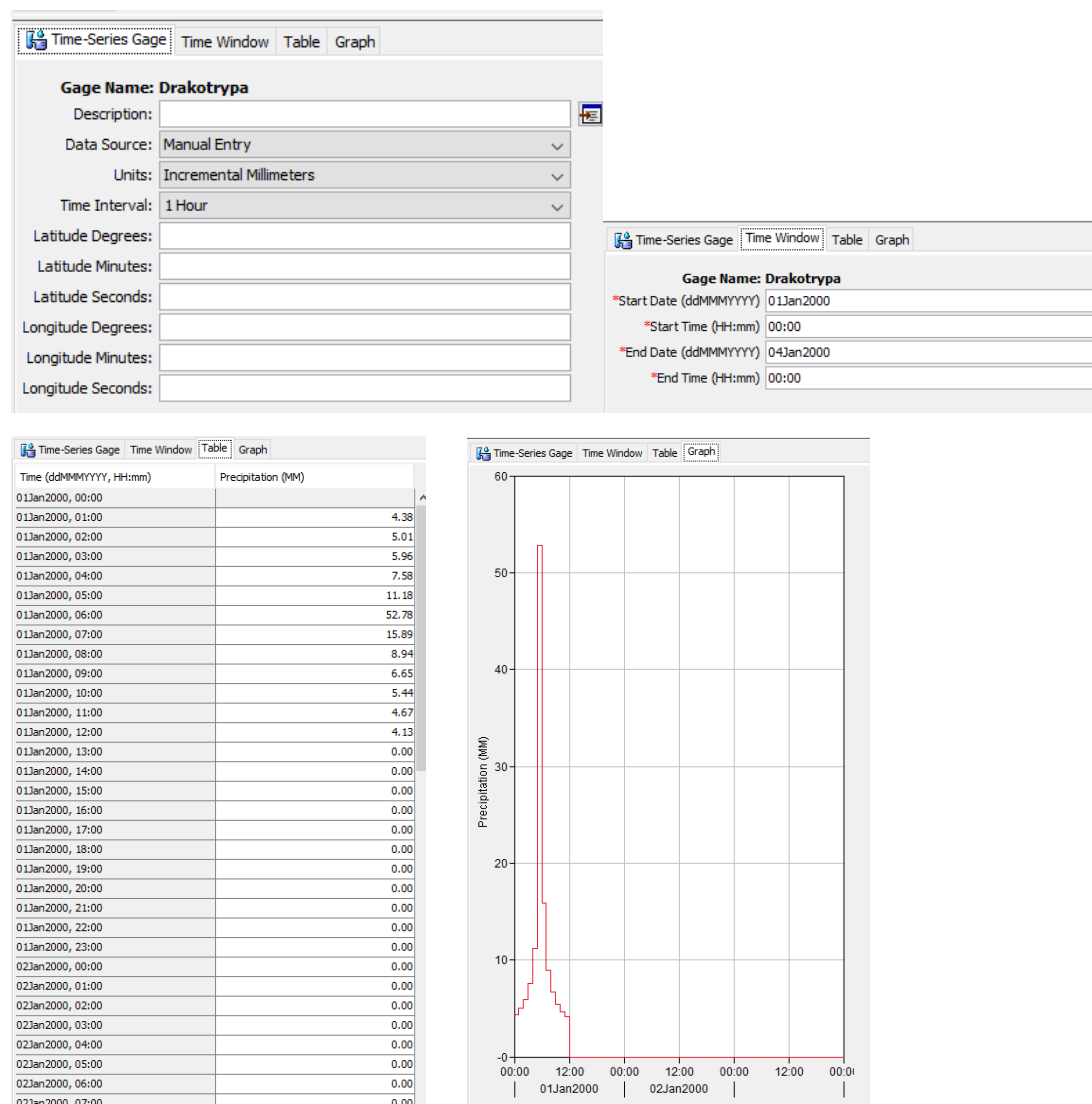
Gage Name	Depth Weight	Time Weight
Drakotrypa	1	1

Σχήμα 3.22: Δημιουργία μετεωρολογικού μοντέλου (αριστερά) ορισμός όμβριας καμπύλης με το βάρος που της αναλογεί (δεξιά) σε περιβάλλον HEC-HMS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Χρονοσειρές βροχόπτωσης

Έπειτα έγινε εισαγωγή των βροχομετρικών δεδομένων με μορφή χρονοσειράς. Στο time series gage ορίζεται το χρονικό βήμα του επεισοδίου της βροχής καθώς και η

μονάδα μέτρησης του ύψους βροχής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έγινε επιλογή χρονικού βήματος ανά μια ώρα και τα ύψη βροχής σε μονάδες μέτρησης χιλιοστών. Στο tab Time Window ορίζεται η διάρκεια του επεισοδίου της βροχής. Στο table αντιστοιχούν οι τιμές του ύψους βροχόπτωσης οι οποίες υπολογίστηκαν με βάση τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Επίσης, το διάγραμμα του υετογραφήματος φαίνεται στο Graph tab. Οι παραπάνω διαδικασίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: Εισαγωγή δεδομένων σε περιβάλλον HEC-HMS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Καθορισμός χρονικής διάρκειας προσομοίωσης

Τέλος, καθορίστηκε το χρονικό όριο του πλημμυρογραφήματος σύμφωνα με το Σχήμα 3.24 που προκύπτει τελικά από το HEC-HMS καθώς και το χρονικό βήμα των υπολογισμών αυτών. Υπενθυμίζεται ότι είναι υδρολογικά σωστό το χρονικό βήμα των υπολογισμών του τελικού πλημμυρογραφήματος να είναι μεγαλύτερο ή ίσο του χρονικού βήματος των υπολογισμών του υετογραφήματος στο προηγούμενο βήμα.

Control Specifications	
Name:	Control 1
Description:	
*Start Date (ddMMMYYYY)	01Jan2000
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMMYYYY)	04Jan2000
*End Time (HH:mm)	00:00
Time Interval:	1 Hour

Σχήμα 3.24: Ορισμός χρονικού ορίου πλημμυρογραφήματος σε περιβάλλον HEC-HMS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

3.3.8 Εφαρμογή της μεθόδου Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη στο λογισμικό HEC-HMS

Για την μετατροπή της βροχής σε απορροή στο περιβάλλον του HEC-HMS χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών. Αρχικά, στο tab Subbasin στην καρτέλα Transform method γίνεται η επιλογή του User-Specified Unit Hydrograph δηλαδή η εισαγωγή Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη. Έπειτα, μέσω του Paired Data Manager επιλέγεται το Unit Hydrograph Curves δηλαδή μοναδιαίες υδρογραφικές καμπύλες. Να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα δίνει κι άλλες επιλογές πέρα από την εισαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος όπως να εισαχθούν σαν δεδομένα οι συναρτήσεις στάθμης-απορροής, η κατανομή αθροιστικών πιθανοτήτων κ.α. Στη συνέχεια, επιλέγονται οι μονάδες μέτρησης του μοναδιαίου υδρογραφήματος καθώς και το χρονικό του βήμα από το tab Paired Data. Στο παράθυρο Table εισάγονται χειροκίνητα οι τιμές των παροχών (m^3/s) και στο παράθυρο Graph απεικονίζεται το μοναδιαίο υδρογράφημα. Τέλος, στο tab Subbasin στο παράθυρο Transform επιλέγεται το μοναδιαίο υδρογράφημα που δημιουργήθηκε στα προηγούμενα βήματα. Οι παραπάνω διαδικασίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.25.

Subbasin Loss Transform Options

Basin Name: Iekani
Element Name: ypolekanh_1

Description:

Downstream: outlet

*Area (KM2): 139.40

Latitude Degrees:

Latitude Minutes:

Latitude Seconds:

Longitude Degrees:

Longitude Minutes:

Longitude Seconds:

Canopy Method: --None--

Surface Method: --None--

Loss Method: SCS Curve Number

Transform Method: User-Specified Unit Hydrograph

Baseflow Method: --None--

Subbasin Loss Transform Options

Basin Name: Iekani
Element Name: ypolekanh_1

*Unit Hydrograph: isoxrones

Passes:

Paired Data Table Graph

Name: isoxrones

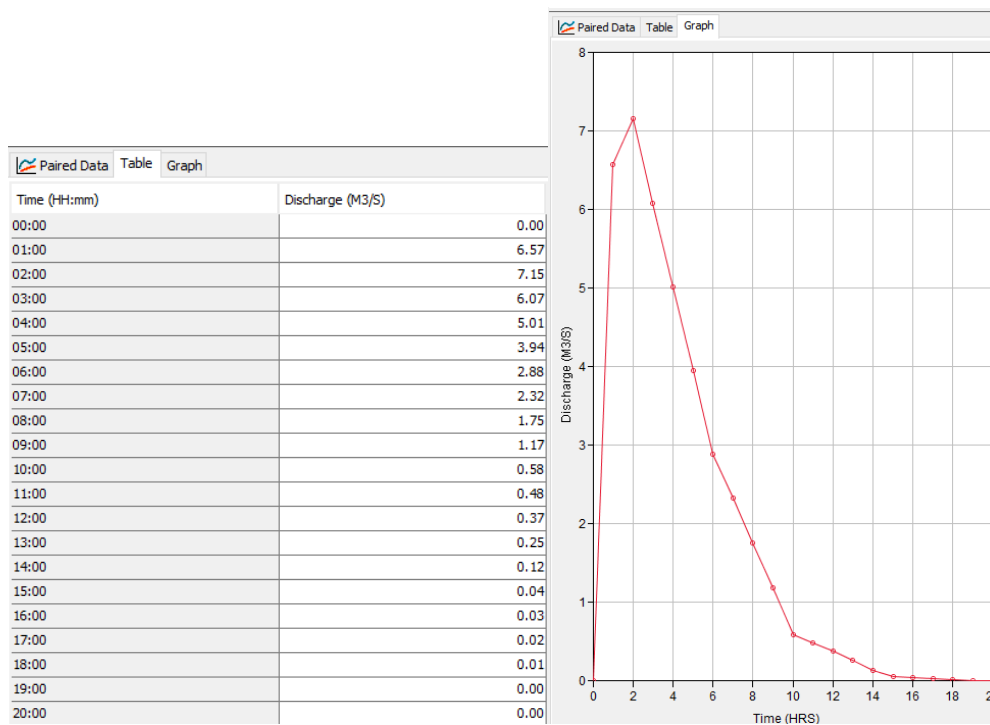
Description:

Data Source: Manual Entry

Units: M3/S

Interval: 1 Hour

Duration: 1 Hour



Σχήμα 3.25: Εφαρμογή της μεθόδου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος Ορισμένο από το Χρήστη στο περιβάλλον HEC-HMS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

3.3.9 Εφαρμογή του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά στο λογισμικό HEC-HMS

Για την μετατροπή της βροχής σε απορροή μια από τις μεθόδους που εφαρμόστηκε είναι το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder. Αρχικά, τα δεδομένα εισόδου που χρειάστηκαν για το λογισμικό HEC-HMS υπολογίζονται μέσω του Arc-GIS και της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. Συγκεκριμένα βρέθηκαν το μέγιστο μήκος υδατορεύματος της λεκάνης μέχρι την έξοδό της (L) καθώς και η απόσταση από την έξοδο της περιοχής μελέτης ως το πλησιέστερο σημείο κατά μήκος του υδατορεύματος στο κέντρο βάρους της λεκάνης (Lca). Οι συντελεστές Cp και Ct, εξαρτώνται από τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Οι τιμές τους κυμαίνονται από 0.56-0.69 κι από 1.80-2.20 αντίστοιχα. Επομένως, τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου στο HEC-HMS είναι ο χρόνος υστέρησης και ο συντελεστής Cp. Για τον υπολογισμό του χρόνου υστέρησης χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω Εξίσωση 3.19:

$$tp = 0.75 * Ct * (Lca * L)^{0.3} \quad (3.19)$$

Όπου Lca (km), L σε (km) και tp σε (h).

Για λόγους πληρότητας παρόλο που δεν απαιτείται από το πρόγραμμα HEC-HMS υπολογίζεται η παροχή αιχμής του Σύνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder από την εξής Εξίσωση 3.20:

$$Qp = Cp * \frac{2.75 * A}{tp} \quad (3.20)$$

Όπου A η έκταση της λεκάνης (km^2), tp (h), Cp (αδιάστατος συντελεστής), Qp (m^3/s)

Οι παράμετροι του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Παράμετροι του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder	Θέση προσομοίωσης
Εμβαδόν (km^2)	139.40
L (km)	16.91
Lca (km)	4.07
Ct	1.85
Cp	0.68
tp (h)	4.94
Qp (m^3/s)	52.79

Στα Σχήματα 3.26 και 3.27 παρουσιάζεται η διαδικασία εφαρμογής του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder στο HEC-HMS.

Subbasin		Loss	Transform	Options
Basin Name: ypolekanh_1				
Element Name: ypolekanh_1				
Description:	<input type="text"/>			
Downstream:	outlet			
*Area (KM2)	139.40			
Latitude Degrees:	<input type="text"/>			
Latitude Minutes:	<input type="text"/>			
Latitude Seconds:	<input type="text"/>			
Longitude Degrees:	<input type="text"/>			
Longitude Minutes:	<input type="text"/>			
Longitude Seconds:	<input type="text"/>			
Canopy Method:	--None--			
Surface Method:	--None--			
Loss Method:	SCS Curve Number			
Transform Method:	Snyder Unit Hydrograph			
Baseflow Method:	--None--			

Σχήμα 3.26: Επιλογή της μεθόδου του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder στο περιβάλλον HEC-HMS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Subbasin		Loss	Transform	Options
Basin Name: ypolekanh_1				
Element Name: ypolekanh_1				
Method:	Standard			
*Standard Lag (HR)	4.94			
*Peaking Coefficient:	0.68			

Σχήμα 3.27: Εισαγωγή δεδομένων με την μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder στο περιβάλλον HEC-HMS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

3.4 Υδραυλική Προσομοίωση

3.4.1 Το λογισμικό HEC-RAS

Το HEC-RAS είναι ένα ελεύθερο λογισμικό, το οποίο δημιουργήθηκε από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικάνικου Στρατού (U.S Army Corps of Engineers- U.S.A.C.E). Κύριος σκοπός του είναι η πραγματοποίηση υπολογισμών για μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες ροής. Επίσης, με τη βοήθεια του μοντέλου δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης της στάθμης του νερού καθώς και προσομοίωσης της μεταφοράς και απόθεσης ιζήματος.

Πιο αναλυτικά, το λογισμικό HEC-RAS αποτελείται από το γραφικό περιβάλλον διεπαφής με το χρήστη, τον πυρήνα υδραυλικών αναλύσεων όπως επίσης προσφέρει την επιλογή αποθήκευσης, διαχείρισης καθώς και επεξεργασίας δεδομένων εισόδου και εξόδου. Επομένως, τα βασικά είδη αναλύσεων τα οποία προσφέρει το λογισμικό είναι (Δρόσου 2015):

- 1) Μόνιμη ροή επιφανειακών υδάτων.
- 2) Μη μόνιμη ροή επιφανειακών υδάτων.
- 3) Προσομοίωση μεταφοράς φερτών με μεταβαλλόμενα όρια.
- 4) Ανάλυση ποιότητας του νερού.

Επιπλέον, στην πλατφόρμα εμπεριέχονται πρόσθετες λειτουργίες οι οποίες ενεργοποιούνται μετά την επίλυση και τον υπολογισμό του προφίλ επιφανειακών υδάτων. Δηλαδή, το βάθος του νερού, η στάθμη και η ταχύτητά του για οποιαδήποτε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Επίσης, είναι εφικτή η εύρεση των μεγίστων και ελαχίστων τιμών των παραπάνω μεγεθών σε κάθε σημείο και σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης (U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

Το HEC-RAS παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της υδραυλικής μελέτης των ποταμών σε μονοδιάστατη ανάλυση (1D), σε δισδιάστατη (2D), καθώς και σε συνδυασμό των δυο (1D/2D). Στην προκειμένη περίπτωση, η υδραυλική ανάλυση πραγματοποιείται σε δύο διαστάσεις. Για τη δισδιάστατη ροή χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης, οι οποίες βασίζονται στην αρχή διατήρησης της μάζας και την αρχή διατήρησης της ορμής, αντίστοιχα.

Η υδραυλική προσομοίωση σε μονοδιάστατη ανάλυση (1D) εφαρμόζεται σε περιπτώσεις ανοιχτών αγωγών οι οποίοι έχουν συγκεκριμένη διατομή. Επίσης, εφαρμόζεται σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο και με απότομες κλίσεις. Η δισδιάστατη ανάλυση (2D) εφαρμόζεται όταν η ποιότητα του ΨΜΕ είναι υψηλή καθώς και σε ήπιες σχετικά κλίσεις. Είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις που υπάρχει ροή και στις δυο διευθύνσεις καθώς και στην διερεύνηση θραύσης φράγματος όπου υπάρχει κίνδυνος η ροή να ακολουθήσει πολλές κατευθύνσεις. Τέλος, η 1D/2D υδραυλική ανάλυση χρησιμοποιείται στην περίπτωση που η περιοχή μελέτης περιλαμβάνει αστικό και μη αστικό περιβάλλον. Για την προσομοίωση του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιείται η μονοδιάστατη ανάλυση, ενώ για τις πεδινές εκτάσεις η δισδιάστατη ανάλυση (Δεβελέκου 2020).

Για τη μελέτη της δισδιάστατης ροής, γίνεται εφαρμογή των εξισώσεων συνέχειας και ποσότητας κίνησης, οι οποίες θεωρούνται μαθηματική έκφραση των εξισώσεων αρχής διατήρησης της μάζας και της διατήρησης της ορμής αντίστοιχα. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι των Navier-Stokes οι οποίες αποτυπώνουν την κίνηση των ρευστών στις τρεις διαστάσεις. Οι εξισώσεις Navier Stokes κατάλληλα ολοκληρωμένες αποτυπώνουν εξισώσεις για ρηχά νερά. Επομένως κρίνεται επιτακτικό να εφαρμοστούν απλοποιήσεις για τη μελέτη της πλημμύρας σε δυο διαστάσεις για ρηχά νερά (Shallow Water Equations). Στην περίπτωση αυτή, πραγματοποιούνται απλοποιήσεις και εφαρμόζονται οι εξισώσεις Saint- Venant οι οποίες βασίζονται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Ασυμπίεστη ροή

- Αμετάβλητη η πυκνότητα του νερού
- Υδροστατική πίεση του ρευστού

Οπότε για συνθήκες μη μόνιμης ροής, η διαφορική Εξίσωση 3.21 των ρηχών υδάτων διατήρησης της μάζας είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3.21)$$

Όπου:

t: ο χρόνος

H(x,y,t) (m): Είναι το υψόμετρο της στάθμης του νερού

h(x,y,t) (m): Εκφράζει το βάθος του ύδατος

u , v (m/s): Είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας στις διευθύνσεις x και y αντιστοίχως

q (m^3/s): Εκφράζει την εισερχόμενη ροή

Συνεχίζοντας, οι Εξισώσεις 3.22 και 3.23 διατήρησης της ορμής ρηχών υδάτων (Saint Venant) σε 2D διαστάσεις για τις διευθύνσεις x και y αντιστοίχως είναι οι εξής:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + vt \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - cfu + fv \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + vt \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - cfv + fu \quad (3.23)$$

Όπου:

u,v (m/s): Οι ταχύτητες στην x και y διεύθυνση αντιστοίχως

g (m/s^2): Εκφράζει την επιτάχυνση της βαρύτητας

vt (m^2/s): Είναι ο συντελεστής οριζόντιου κινηματικού ιξώδους

H(x,y,t) (m): Είναι το υψόμετρο της στάθμης του ύδατος

cf (s^{-1}): Εκφράζει τον συντελεστή τριβής στον πυθμένα

f (s^{-1}): Είναι η παράμετρος Coriolis

Σε κάποιες περιπτώσεις με ροή ρηχών υδάτων, ο συντελεστής τριβής στον πυθμένα και η επιτάχυνση της βαρύτητας αποτελούν βασικές παραμέτρους στις εξισώσεις κίνησης, ενώ η παράμετρος Coriolis, η μεταγωγική επιτάχυνση, το ιξώδες και η τοπική επιτάχυνση δεν λαμβάνονται υπόψιν (Δεβελέκου 2020). Σε μια τέτοια περίπτωση, γίνεται αναγωγή της εξίσωσης κίνησης σε δισδιάστατη μορφή των εξισώσεων κύματος διάχυσης (Diffusion Wave Approximation). Αν συνδυαστούν η εξίσωση αρχής διατήρησης της μάζας με την παραπάνω εξίσωση προκύπτουν οι Εξισώσεις Diffusion Wave Approximation of the Shallow Water (DSW) και είναι οι ακόλουθες 3.24 και 3.25 (U.S. Army Corps of Engineers, 2016):

$$-g \frac{\partial H}{\partial x} = cfu \quad (3.24)$$

$$-\frac{\partial H}{\partial y} = cfv \quad (3.25)$$

3.4.2 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό HEC-RAS

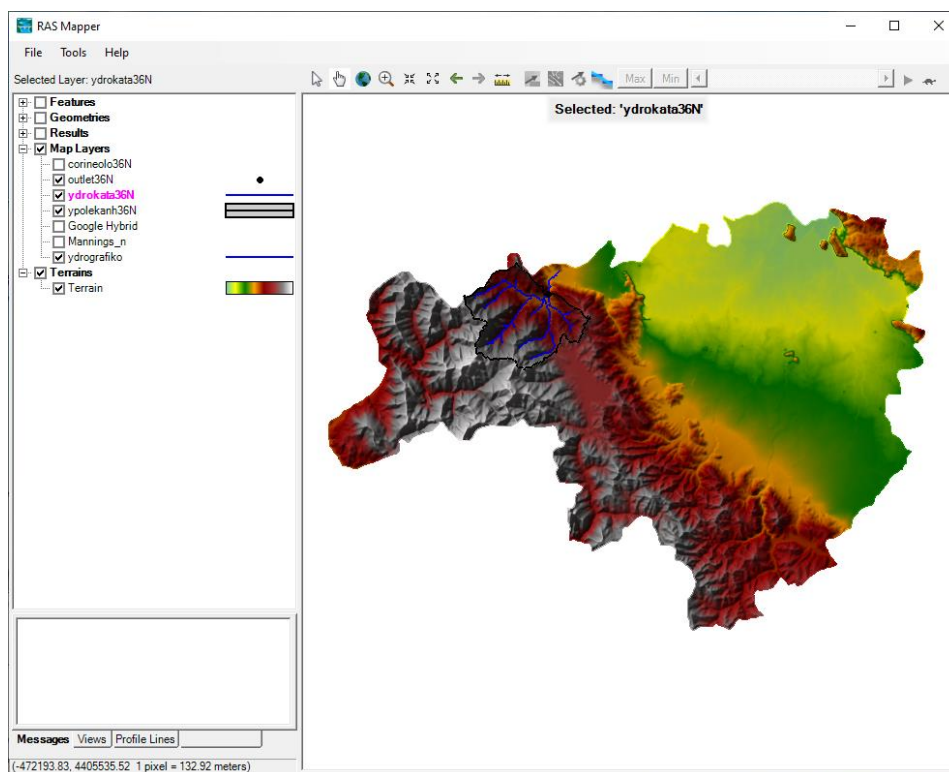
Τα δεδομένα που χρειάζονται για την εφαρμογή της υδραυλικής προσομοίωσης στο HEC-RAS και παρέχονται από το λογισμικό ArcGIS είναι τα εξής: Το ΨΜΕ της ευρύτερης περιοχής στην υπολεκάνη που εξετάζεται σε κανονικοποιημένη μορφή (Raster), τα διανυσματικά αρχεία μορφής (Vector) όπως η υπολεκάνη μελέτης, το υδρογραφικό δίκτυο της υπολεκάνης, καθώς και το σημείο εξόδου της υπολεκάνης και οι κατηγορίες χρήσεων γης της ευρύτερης περιοχής. Στις κατηγορίες χρήσεων γης, προστέθηκε και μια στήλη η οποία περιλαμβάνει τις τιμές του συντελεστή Manning ανά κατηγορία χρήσεων γης για να προσδιοριστεί η τραχύτητα του εδάφους ανά περίπτωση σύμφωνα με τον Πίνακα 3.6. Τέλος, προστέθηκε το υδρογραφικό δίκτυο κατάντη της υπολεκάνης για μια αρχική οπτικοποίηση των όχθων καθώς και τα τελικά πλημμυρογραφήματα που υπολογίστηκαν με το πρόγραμμα HEC-HMS.

Πίνακας 3.6: Συντελεστές τραχύτητας Manning ανά κατηγορία χρήσεων γης (Πηγή: Παπαϊοάννου G. et al., 2018)

LABEL1	LABEL2	LABEL3	Mannings n	
1 Artificial surfaces	1.1 Urban fabric	1.1.1 Continuous urban fabric	0.013	
		1.1.2 Discontinuous urban fabric		
	1.2 Industrial, commercial and transport units	1.2.1 Industrial or commercial units		0.013
		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		0.013	
	1.3.2 Dump sites			
1.4 Artificial, non-agricultural vegetated areas	1.3.3 Construction sites		0.025	
	1.4.1 Green urban areas			
2 Agricultural areas	2.1 Arable land	1.4.2 Sport and leisure facilities		0.03
		2.1.1 Non-irrigated arable land		
		2.1.2 Permanently irrigated land		
	2.2 Permanent crops	2.1.3 Rice fields		0.08
		2.2.1 Vineyards		
		2.2.2 Fruit trees and berry plantations		
	2.3 Pastures	2.2.3 Olive groves		0.035
		2.3.1 Pastures		
	2.4 Heterogeneous agricultural areas	2.4.1 Annual crops associated with permanent crops		0.04
		2.4.2 Complex cultivation patterns		0.04
2.4.3 Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation		0.05		
2.4.4 Agro-forestry areas		0.06		
3 Forest and semi natural areas	3.1 Forests	3.1.1 Broad-leaved forest		0.1
		3.1.2 Coniferous forest		
		3.1.3 Mixed forest		
	3.2 Scrub and/or herbaceous vegetation associations	3.2.1 Natural grasslands		0.04
		3.2.2 Moors and heathland		0.05
		3.2.3 Sclerophyllous vegetation		0.05
		3.2.4 Transitional woodland-shrub		0.06
	3.3 Open spaces with little or no vegetation	3.3.1 Beaches, dunes, sands		0.025
		3.3.2 Bare rocks		0.035
		3.3.3 Sparsely vegetated areas		0.027
3.3.4 Burnt areas		0.025		
3.3.5 Glaciers and perpetual snow		0.01		
4 Wetlands	4.1 Inland wetlands	4.1.1 Inland marshes		0.04
		4.1.2 Peat bogs		
	4.2 Maritime wetlands	4.2.1 Salt marshes		0.04
		4.2.2 Salines		
		4.2.3 Intertidal flats		
5 Water bodies	5.1 Inland waters	5.1.1 Water courses		0.05
		5.1.2 Water bodies		
	5.2 Marine waters	5.2.1 Coastal lagoons		0.07
		5.2.2 Estuaries		
		5.2.3 Sea and ocean		

3.4.3 Εφαρμογή υδραυλικής προσομοίωσης μέσω του λογισμικού HEC-RAS

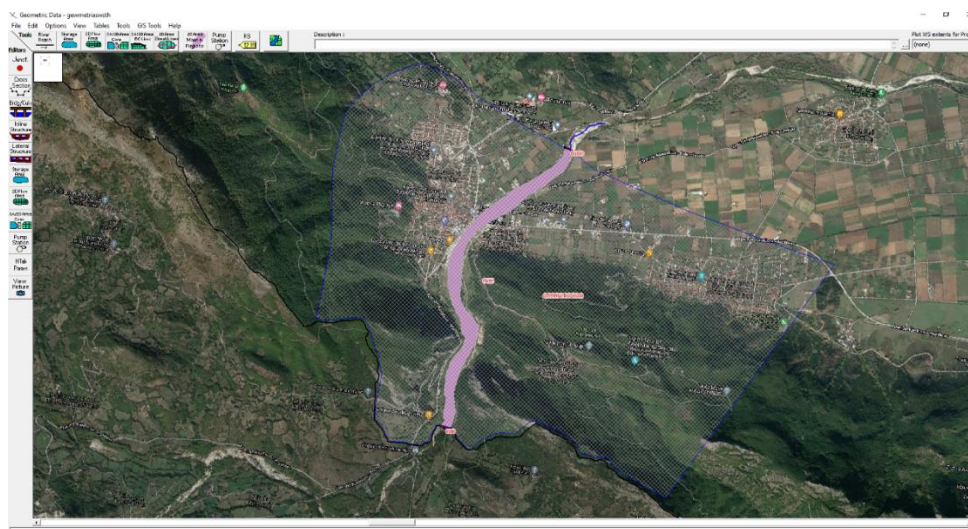
Αρχικά, δημιουργείται ένα νέο Project στο οποίο οι μονάδες μέτρησης επιλέγονται στο System International (Metric System). Έπειτα, στο μενού του HEC-RAS επιλέγεται το RAS-Mapper σύμφωνα με το Σχήμα 3.28 και φορτώνονται τα δεδομένα εισόδου που περιεγράφηκαν προηγουμένως. Επιπρόσθετα, ορίζεται το κατάλληλο σύστημα αναφοράς.



Σχήμα 3.28: Λεκάνη απορροής Καρδίτσας με τα δεδομένα εισόδου στο περιβάλλον RAS Mapper του HEC- RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Στη συνέχεια, δημιουργείται το αρχείο της γεωμετρίας από το μενού του HEC-RAS σύμφωνα με το Σχήμα 3.29, επιλέγεται το Geometry Data Editor η οποία αφορά την υδραυλική προσομοίωση κατάντη της υπολεκάνης μελέτης. Μέσω του εργαλείου Select layers to view in background, φορτώνονται τα δεδομένα εισόδου από το RAS- Mapper. Για τον σχεδιασμό του πλημμυρικού πεδίου επιλέγεται το εργαλείο 2D Flow Area και η παραγωγή του αντίστοιχου πλέγματος μέσω του Force Mesh Recomputation. Επίσης, σύμφωνα με το εργαλείο 2D Area Boundary Conditions Lines σχεδιάζονται οι θέσεις που εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες οι οποίες βρίσκονται ανάντη και κατάντη της περιοχής που πραγματοποιείται η υδραυλική προσομοίωση. Για τη σχεδίαση των όχθων του ποταμού μέσω του εργαλείου 2D Area Mann n Regions γίνεται επιλογή ξεχωριστού συντελεστή Manning. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκε 0.025. Σε περίπτωση απότομων αλλαγών στο ποτάμι, αυτές μπορούν να διορθωθούν μέσω του εργαλείου 2D Area Breaklines, δηλαδή γραμμές

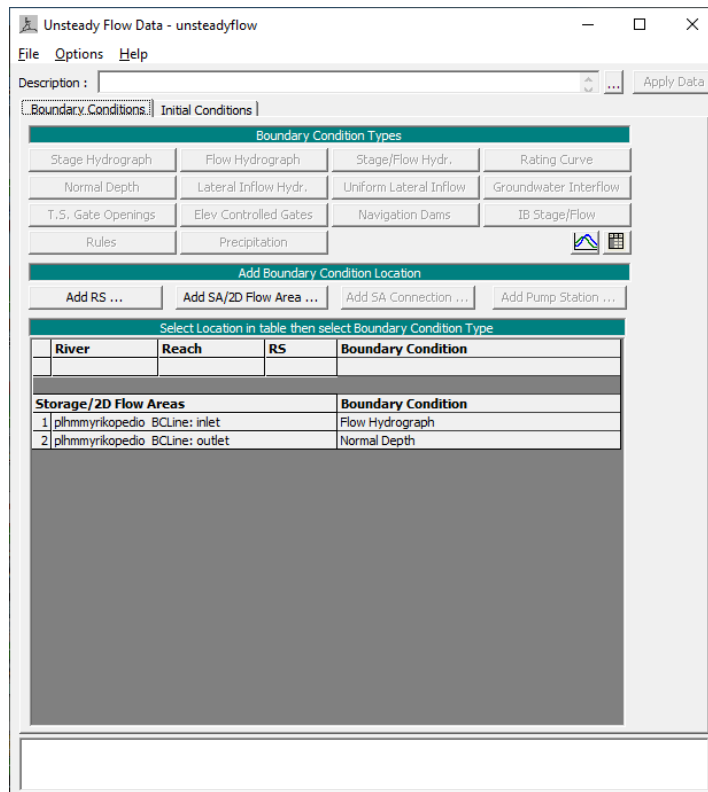
θλάσης που εξομαλύνουν τα κατάλληλα κομμάτια που απαιτούνται. Με τη βοήθεια του εργαλείου Google Hybrid δύναται πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της περιοχής μελέτης.



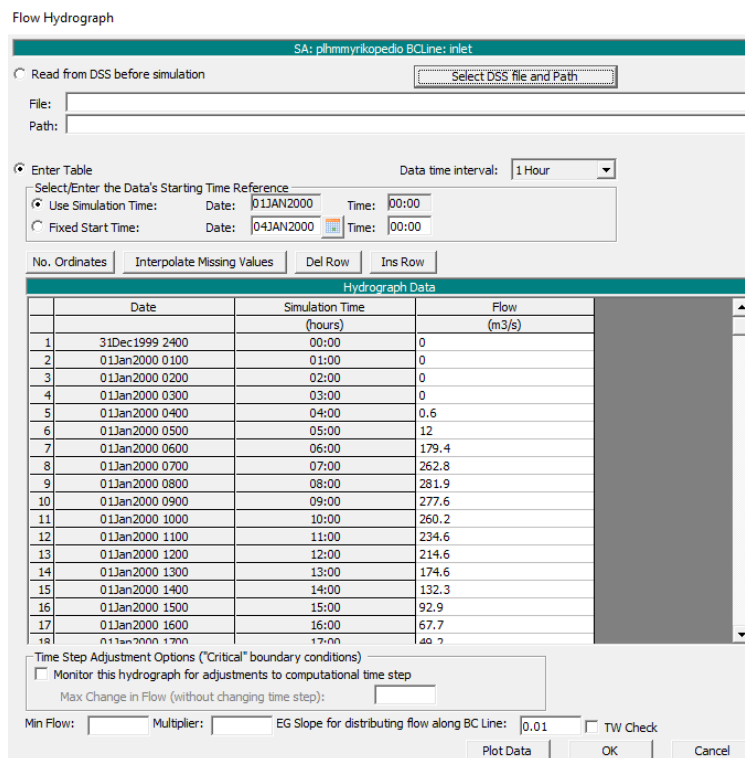
Σχήμα 3.29: Γεωμετρία περιοχής μέσω του Geometry Data Editor σε περιβάλλον HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας, επιλέγεται από το αρχικό μενού του HEC-RAS το View/Edit Unsteady Flow Data για να οριστούν οι συνοριακές συνθήκες της περιοχής. Για την πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας απαραίτητο είναι όπως αναφέρθηκε στο Geometry Data Editor η σχεδίαση των οριακών συνθηκών ανάντη και κατόντη της περιοχής μέσω του 2D Area Boundary Conditions Lines. Επομένως, για τις συνοριακές συνθήκες επιλέχθηκε για την ανάντη συνθήκη το υδρογράφημα παροχής (Flow Hydrograph), ενώ για την κατόντη συνθήκη το ομοιόμορφο βάθος (Normal Depth).

Πιο αναλυτικά, για την ανάντη οριακή συνθήκη εισήχθη το πλημμυρογράφημα ως αποτέλεσμα του λογισμικού HEC-HMS, με βάση τις δύο μεθόδους βροχής απορροής (μέθοδος Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών και του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder). Επίσης, ο χρήστης ορίζει τις ημερομηνίες και τις ώρες αρχής και τέλους της προσομοίωσης όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση πρέπει να συμπίπτουν μ' αυτές του πλημμυρογραφήματος. Η κλίση της γραμμής ενέργειας ορίζεται στην τιμή 0.01. Όσον αφορά την κατόντη οριακή συνθήκη, εισήχθη το ομοιόμορφο βάθος (Normal Depth) η τιμή του οποίου προκύπτει δεδομένου τον ρυθμό απωλειών λόγω τριβής. Μια μέση τιμή είναι κοντά στο 0.01, η οποία και χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία. Η παραπάνω μεθοδολογία αποτυπώνεται στα Σχήματα 3.30, 3.31 και 3.32.



Σχήμα 3.30: Συνοριακές συνθήκες στο περιβάλλον Unsteady Flow Data του HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 3.31: Εισαγωγή πλημμυρογραφήματος από το λογισμικό HEC-HMS ως ανάντη οριακή συνθήκη στο περιβάλλον HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Normal Depth Downstream Boundary

SA: plhmmyrikopedio BCLine: outlet

Friction Slope: 0.01

2D Flow Area Boundary Condition Parameters

Compute separate water surface elevation per face along BC Line

Compute single water surface for entire BC Line

OK Cancel

Σχήμα 3.32: Εισαγωγή ομοιόμορφου βάθους ως κατάντη οριακή συνθήκη στο περιβάλλον Unsteady Flow Data Editor του HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Σαν τελικό στάδιο, από το αρχικό μενού του HEC-RAS επιλέγεται το εργαλείο Perform an unsteady flow simulation. Με αυτό το εργαλείο επιλέγονται μια μια οι προηγούμενες διαδικασίες δηλαδή το αρχείο της γεωμετρίας και το αρχείο των συνοριακών συνθήκων λόγω μη μόνιμης ροής. Επίσης, ο χρήστης ορίζει τις ημερομηνίες και τις ώρες της αρχής και του τέλους της προσομοίωσης. Πιο αναλυτικά, επιλέγεται η προεπεξεργασία της γεωμετρίας (Geometry Preprocessor), η προσομοίωση της μη μόνιμης ροής (Unsteady Flow Simulation), η μετεπεξεργασία μη μόνιμης ροής (Post Processor) με την οποία υπολογίζονται πληροφορίες σχετικά με το ύψος ροής για πολλά χρονικά διαστήματα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής. Τέλος, γίνεται η επιλογή απεικόνισης του πλημμυρικού πεδίου σε χάρτη (Floodplain Mapping). Το χρονικό βήμα των υπολογισμών τίθεται στα 5 sec, ενώ το χρονικό βήμα για την εξαγωγή των χαρτογραφημένων αποτελεσμάτων ορίζεται στα 10 min. Τα χρονικά βήματα των εξαγόμενων υδρογραφημάτων και των λεπτομερών αποτελεσμάτων τίθεται 10 min και τα δυο. Το παράθυρο του Perform an unsteady flow simulation διακρίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.33. Μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παράθυρο του RAS-Mapper, όπου καθίσταται ικανή περαιτέρω επεξεργασία στο λογισμικό ArcGIS.

Unsteady Flow Analysis

File Options Help

Plan : unsteadyanalysis Short ID: 1

Geometry File : gewmetriaswst

Unsteady Flow File : unsteadyflow

Programs to Run

Geometry Preprocessor

Unsteady Flow Simulation

Sediment

Post Processor

Floodplain Mapping

Simulation Time Window

Starting Date: 01JAN2000 Starting Time: 00:00

Ending Date: 04JAN2000 Ending Time: 00:00

Computation Settings

Computation Interval: 5 Second Hydrograph Output Interval: 10 Minute

Mapping Output Interval: 10 Minute Detailed Output Interval: 10 Minute

DSS Output Filename: C:\hec\sisoxr2\sisoxrones.dss

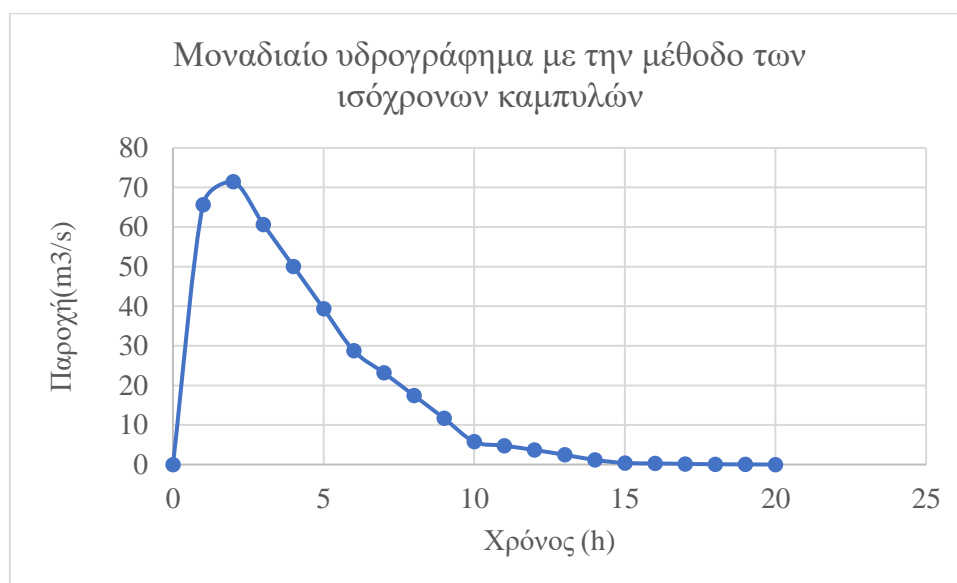
Compute

Σχήμα 3.33: Πραγματοποίηση υπολογισμών μέσω του περιβάλλοντος Unsteady Flow Analysis του λογισμικού HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Αποτελέσματα υδρολογικής ανάλυσης

Αρχικά, παράχθηκε το μοναδιαίο υδρογράφημα της υπολεκάνης μελέτης. Αυτό επιτεύχθηκε μέσω της μεθόδου του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη για τη μετατροπή της βροχής σε απορροή, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3 για τον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος (Σχήμα 4.1).



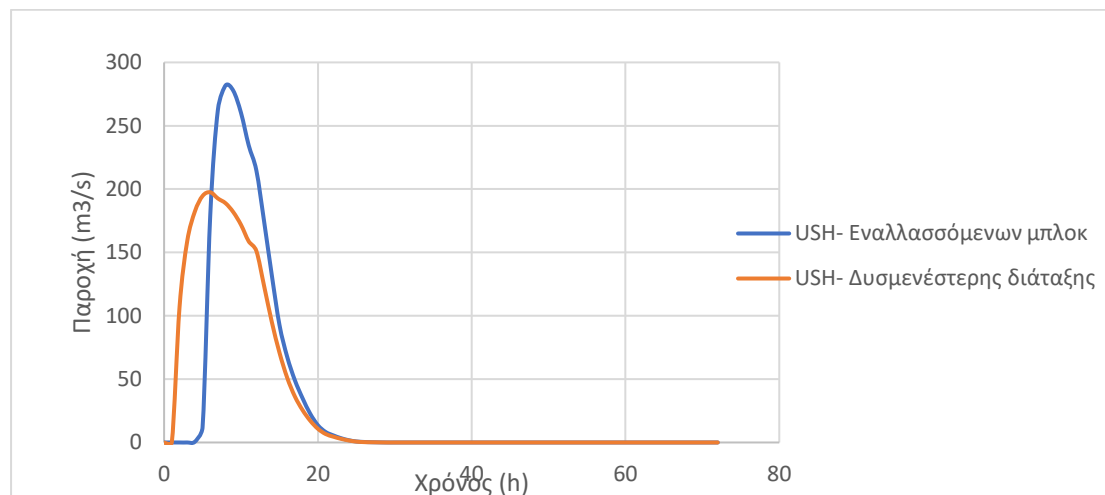
Σχήμα 4.1: Μοναδιαίο υδρογράφημα με την μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών
(Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Όσον αφορά τα βασικά χαρακτηριστικά του προκύπτει παροχή αιχμής $71.47 \text{ m}^3/\text{s}$. Ο χρόνος αιχμής του αντιστοιχεί στις 2 h και ο χρόνος βάσης του τις 20 h. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το σχήμα του μοναδιαίου υδρογραφήματος εξαρτάται από (Μιμίκου Μπαλτάς 2012):

- 1) Τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής
- 2) Τα χαρακτηριστικά του κατακρημνίσματος

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του κατακρημνίσματος νοείται η μορφή του. Σε περίπτωση που είναι βροχή αφορά την ένταση, τη διάρκεια, τη χρονική κατανομή της, την διεύθυνσή της, την κατανομή της και τον τύπο της βροχής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η διάρκεια βροχόπτωσης είναι 1 h και συνολικού ύψους 10 mm. Τα βασικά φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης είναι το σχήμα της, το μέγεθός της, η κλίση των πρανών και του κύριου υδατορευματός της, το ανάγλυφο του εδάφους της, η κατανομή και η πυκνότητα του δικτύου των ρεμάτων της και το ποσοστό και το είδος της φυτοκάλυψης.

Σ' αυτό το σημείο αξίζει να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των πλημμυρογραφήματων με την μέθοδο του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη όπου για την εύρεση του υετογραφήματος σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ και την μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης. Τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα 4.2:



Σχήμα 4.2: Πλημμυρογραφήματα με την μέθοδο Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ και της δυσμενέστερης διάταξης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

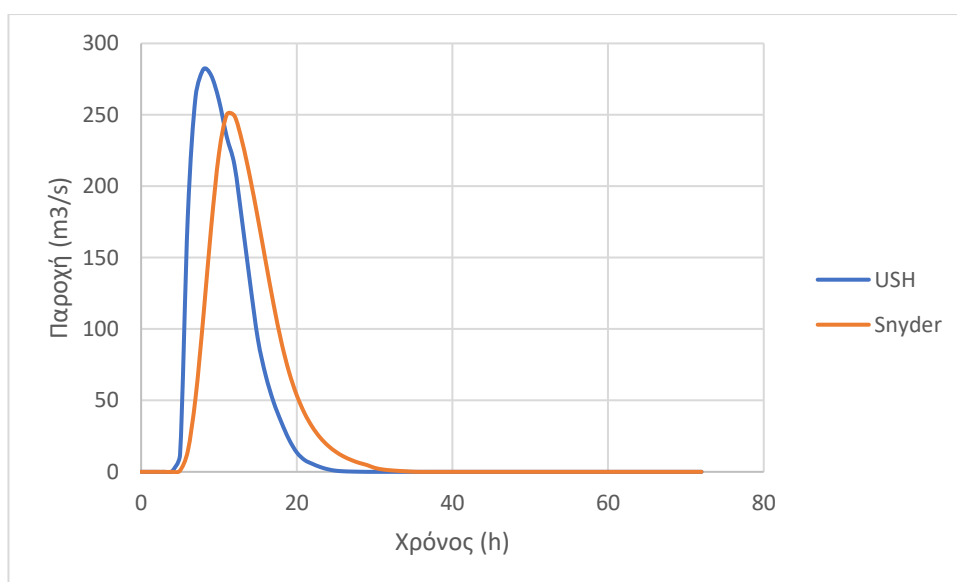
Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω πλημμυρογραφήματων η μέθοδος των εναλλασσόμενων μπλοκ παρουσιάζει παροχή αιχμής $282 \text{ m}^3/\text{s}$ και χρόνο αιχμής στις 8 h. Όσον αφορά την μέθοδο της δυσμενέστερης διάταξης παρουσιάζει παροχή αιχμής $197.5 \text{ m}^3/\text{s}$ και χρόνο αιχμής στις 6 h. Αυτό συμβαίνει επειδή η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης εμφανίζει τις απώλειες βροχής νωρίτερα σε σχέση με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης είναι δυσμενέστερη ως προς τον χρόνο αιχμής του πλημμυρογραφήματος της που είναι μικρότερος σε σχέση με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ.

Έπειτα, έγινε εφαρμογή του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder. Υπενθυμίζεται ότι τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα εφαρμόζονται σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις, είναι εμπειρικές μέθοδοι όπου σημαντικό ρόλο παίζει η ρύθμιση των παραμέτρων στις σχέσεις υπολογισμού της αιχμής και του χρόνου διάρκειας μεταξύ του κέντρου βάρους της βροχής και της αιχμής. Σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 4.1, η παροχή αιχμής του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder είναι $52.79 \text{ m}^3/\text{s}$.

Πίνακας 4.1: Παράμετροι του συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder	Θέση προσομοίωσης
Εμβαδόν (km^2)	139.40
L (km)	16.91
Lca (km)	4.07
Ct	1.85
Cp	0.68
tp (h)	4.94
Qp (m^3/s)	52.79

Μετά τον υπολογισμό των μοναδιαίων υδρογραφήματων, υπολογίστηκε η καταιγίδα σχεδιασμού 12 ωρών και περιόδου επαναφοράς 100 χρόνων με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. Για τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ επιλέχθηκε η όμβρια καμπύλη Δρακότρυπα η μοναδική που βρίσκεται εντός της περιοχής μελέτης. Στην συνέχεια στο λογισμικό HEC-HMS εισάγεται το υετογράφημα σχεδιασμού με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ καθώς επίσης και το Ορισμένο Μοναδιαίο Υδρογράφημα από τον Χρήστη μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών καθώς και οι κατάλληλες παράμετροι της μεθόδου του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder. Μ' αυτόν τον τρόπο προκύπτουν τα πλημμυρογραφήματα των δυο μεθόδων (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3: Πλημμυρογραφήματα με δύο μεθόδους (μέθοδος Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη, Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder) στο σημείο προσομοίωσης της υπολεκάνης μελέτης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Σύμφωνα με τα παραπάνω πλημμυρογραφήματα, η μέθοδος Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη μέσω των ισόχρονων καμπυλών παρουσιάζει παροχή αιχμής $282 \text{ m}^3/\text{s}$ και χρόνο αιχμής στις 8 h. Όσον αφορά την μέθοδο Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder εμφανίζει παροχή αιχμής $250 \text{ m}^3/\text{s}$ και χρόνο αιχμής 11 h.

Με βάση τα αποτελέσματα, η μέθοδος του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών εμφανίζει μεγαλύτερη παροχή αιχμής και σε μικρότερο χρόνο σε σχέση με την μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η μέθοδος του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών απαιτεί μεγαλύτερο όγκο δεδομένων και περισσότερο χρόνο όμως υπολογίζει το μοναδιαίο υδρογράφημα πιο αναλυτικά και επιτρέπει στον μελετητή να προσαρμόσει τις μεταβλητές της, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη αποτύπωση του συνδυασμού βροχής απορροής (Theochari, Develekou and Baltas 2021).

4.2 Αποτελέσματα υδραυλικής προσομοίωσης

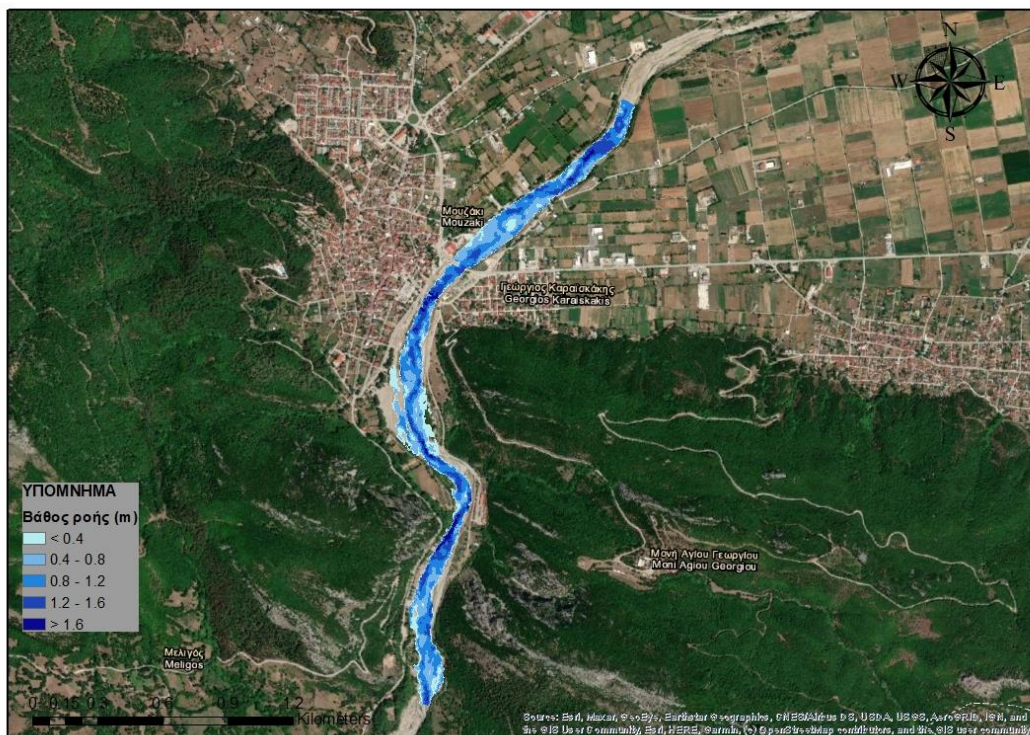
Όπως έχει αναφερθεί η υδραυλική προσομοίωση πραγματοποιείται κατάντη της εξόδου της υπολεκάνης που μελετάται σε δυο διαστάσεις και για συνθήκες μη μόνιμης ροής. Το πλημμυρογράφημα που υπολογίστηκε με τη διεξαγωγή της υδρολογικής ανάλυσης, αποτελεί δεδομένο της υδραυλικής προσομοίωσης ως ανάντη οριακή συνθήκη.

Η υδραυλική προσομοίωση αφορά την περιοχή του Μουζακίου 13122 κατοίκων σύμφωνα με την απογραφή του 2011 της ΕΛ.ΣΤΑΤ. Ως προς τις χρήσεις γης στην περιοχή του Μουζακίου επικρατεί αστικός ιστός καθώς επίσης και μη αρδευόμενη αρόσιμη γη. Κύριος σκοπός της προσομοίωσης αποτελεί η εκτίμηση της έκτασης του πλημμυρικού πεδίου καθώς και ο υπολογισμός του χάρτη μέγιστου βάθους ροής και μέγιστης ταχύτητας ροής.

Τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου. Αρχικά, η ανάλυση του DEM παίζει σπουδαίο ρόλο καθώς ένα αδρό DEM δεν μπορεί να αποτυπώσει με ακρίβεια τη γεωμετρία του υδατορεύματος και πιθανότατα να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα (Δεβελέκου 2020). Επίσης, ο συντελεστής τραχύτητας εδάφους (συντελεστής Manning) επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν ποικίλες αναφορές για τις τιμές αυτών όμως παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις.

Με βάση τα αποτελέσματα με τη μέθοδο Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών για το χάρτη μεγίστων βαθών προκύπτει μέση τιμή του βάθους ροής 0.84 m και φθάνει σε κάποιες θέσεις τα 2.34 m. Όσον αφορά τον χάρτη μεγίστων ταχυτήτων εκτιμάται μέση τιμή ταχύτητας ροής με την ίδια μέθοδο 3.32 m/s και σε κάποιες περιοχές ανέρχεται στα 6.84 m/s . Ο χάρτης μεγίστων βαθών μέσω της μεθόδου του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder υπολογίζει μέση τιμή του βάθους ροής 0.79 m και

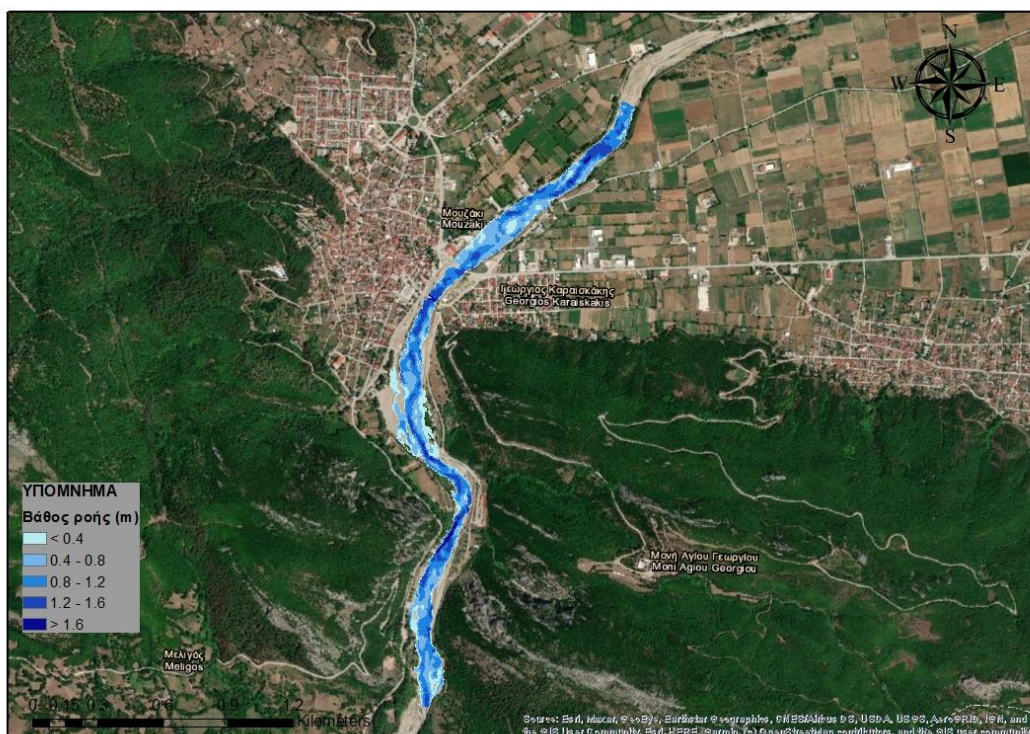
φθάνει μέχρι τα 2.25 m σε κάποια σημεία. Ο χάρτης μεγίστων ταχυτήτων μέσω της μεθόδου του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder εκτιμάει μέση τιμή ταχύτητας ροής 3.17 m/s και σε ορισμένες θέσεις ανέρχεται στα 6.53 m/s. Από την εκτέλεση της παραπάνω μεθοδολογίας, διαπιστώνεται ότι και με τις δυο μεθόδους μετασχηματισμού βροχής απορροής πλημμυρίζουν περιοχές χρήσεων γης με σκληροφυλλική βλάστηση με βάθη ροής εύρους 1.2-1.6 m και ταχύτητες ροής 4-5 m/s. Επιπρόσθετα, πλημμυρίζουν περιοχές μη αρδευόμενης ορόσιμης γης με τα βάθη ροής να ξεπερνούν σε κάποιες περιοχές τα 1.6 m και οι ταχύτητες ροής να κυμαίνονται 5-6 m/s και περιοχές ασυνεχούς αστικού ιστού με βάθη ροής εντός του διαστήματος 0.8-1.2 m και ταχύτητες ροής 3-4 m/s. Οι χάρτες των μεγίστων βαθών ροής σύμφωνα με τα Σχήματα 4.4 και 4.5 καθώς και των μεγίστων ταχυτήτων ροής των δυο μεθόδων σύμφωνα με τα Σχήματα 4.6 και 4.7 είναι οι εξής:



Σχήμα 4.4: Χάρτης μεγίστων βαθών μέσω της μεθόδου Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη (Πηγή : ίδια επεξεργασία).



Σχήμα 4.5: Χάρτης μεγίστων ταχυτήτων ροής μέσω της μεθόδου Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη (Πηγή: ίδια επεξεργασία).



Σχήμα 4.6: Χάρτης μεγίστων βαθών με την μεθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder (Πηγή: ίδια επεξεργασία).

- Αναζήτηση λαθών στο μοντέλο σε περίπτωση μη αναμενόμενης σχέσης μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου.
- Απλούστευση του μοντέλου με τη διόρθωση δεδομένων εισόδου τα οποία δεν έχουν επίπτωση στο αποτέλεσμα ή αναγνωρίζοντας και αφαιρώντας περιττά τμήματα της δομής του μοντέλου.
- Ενίσχυση επικοινωνίας μεταξύ των δημιουργών του μοντέλου και των υπευθύνων που λαμβάνουν αποφάσεις.
- Σε περίπτωση βαθμονόμησης μοντέλων με μεγάλο αριθμό παραμέτρων, κρίνεται βολικό η επιλογή παραμέτρων με μεγάλη ανάλυση ευαισθησίας. Μη γνωρίζοντας τις κατάλληλες παραμέτρους μπορεί να οδηγήσει στην αφιέρωση άσκοπου χρόνου για μη ευαίσθητες παραμέτρους.
- Η αναζήτηση και ο εντοπισμός σημείων τομής μεταξύ των παρατηρήσεων, των δεδομένων εισόδου και την ικανότητα προβλέψεων οδηγεί στη δημιουργία καλύτερων μοντέλων.

5.2 Μέθοδος «Once at a time»

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε εφαρμογή της μεθόδου Once-at-a-time (OAT). Είναι από τις πιο απλές και πιο διαδοσμένες μεθόδους ανάλυσης ευαισθησίας όπου αλλάζοντας μια παράμετρο μελετάται η ενδεχόμενη μεταβολή του τελικού αποτελέσματος (Campbell 2008). Συγκεκριμένα, μεταβάλλεται μια μόνο μεταβλητή εντός του πεδίου ορισμού της διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές στην αρχική τους τιμή. Έπειτα, επαναφέρεται η τιμή της προηγούμενης μεταβλητής στην αρχική της και μεταβάλλεται μία άλλη με την ίδια διαδικασία. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν εξετάζει το πεδίο ορισμού όλων των μεταβλητών εισόδου και δεν καθίστανται δυνατό να ελέγξει την ταυτόχρονη μεταβολή των μεταβλητών με αποτέλεσμα να καθίστανται αδύνατη η αλληλεπίδραση που έχουν αυτές οι μεταβλητές μεταξύ τους.

Η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε για την παράμετρο CN. Η μέθοδος υπολογισμού της παραμέτρου CN είναι εμπειρική για την πρόβλεψη των απωλειών βροχής. Ο αριθμός καμπύλης CN είναι αδιάστατος με εύρος τιμών από 0 έως και 100. Μικρές τιμές υποδηλώνουν διαπερατό έδαφος, ενώ μεγάλες αδιαπέρατο. Επομένως, κρίνεται ενδιαφέρουσα η ανάλυση ευαισθησίας της συγκεκριμένης παραμέτρου.

5.3 Ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN

Η αρχική τιμή της παραμέτρου CN η οποία έγινε για συνθήκες υγρασίας τύπου II προέκυψε 72. Η ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη καθώς και του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder για τις εξής μεταβολές της παραμέτρου κατά: 2% , 4% και 6% σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Τιμές της παράμετρος CN με βάση τα ποσοστά μεταβολής της (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

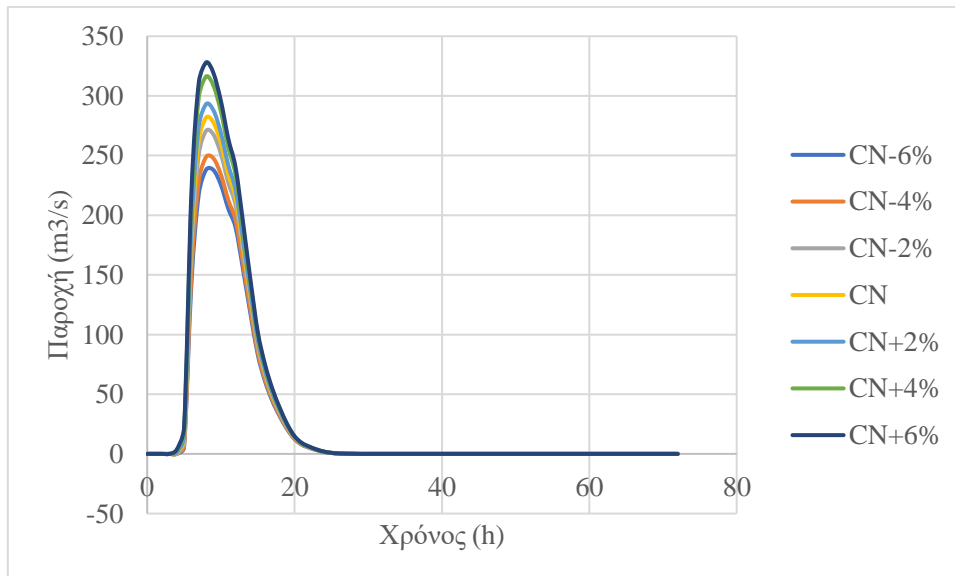
Τιμές της παραμέτρου CN για την ανάλυση ευαισθησίας						
-6%	-4%	-2%	CN	+2%	+4%	+6%
68	69	71	72	73	75	76

Παρακάτω παρατίθενται η ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής με βάση τις μεταβολές της παραμέτρου που αναφέρθηκαν προηγουμένως για τη μέθοδο Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2.

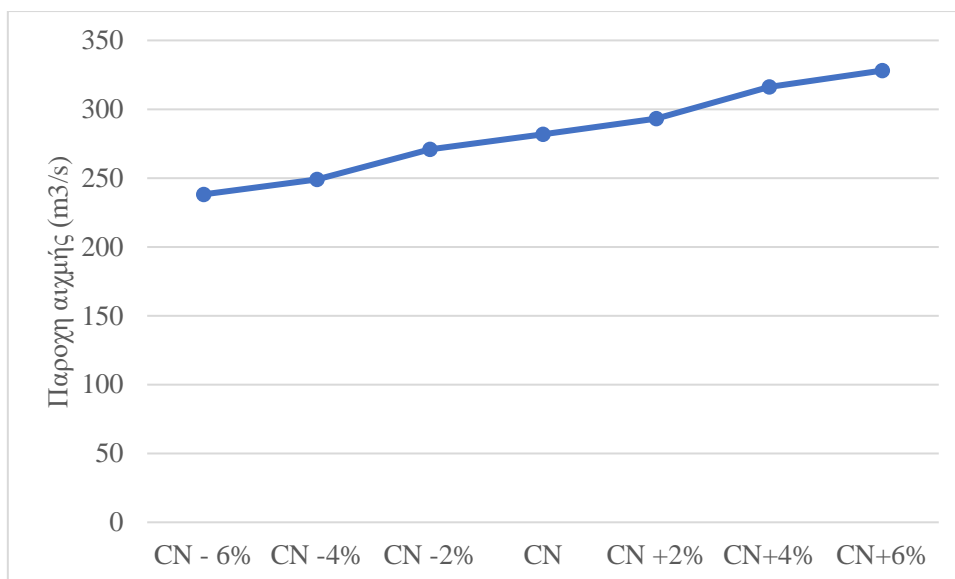
Πίνακας 5.2: Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφήματων για ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN της μεθόδου του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

	Qmax (m ³ /s)	tQmax (h)	ΔQ (%)
CN -6%	238.2	8	-15.50
CN -4%	248.9	8	-11.71
CN -2%	270.8	8	-3.94
CN	281.9	8	0.00
CN +2%	293.2	8	+4.01
CN +4%	316.3	8	+12.20
CN +6%	328.1	8	+16.39

Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά πλημμυρογράφηματα καθώς και η μεταβολή της παροχής αιχμής για κάθε μεταβολή στα παρακάτω Σχήματα 5.1 και 5.2 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1: Πλημμυρογραφήματα στο σημείο εξόδου της περιοχής μελέτης για ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN μέσω της μεθόδου Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

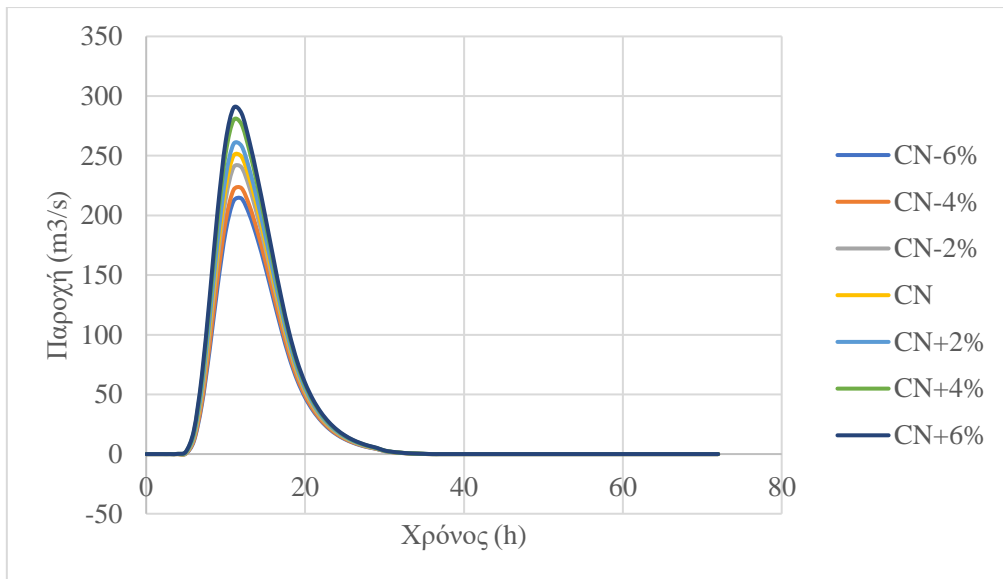


Σχήμα 5.2: Παροχή αιχμής για ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN της μεθόδου του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

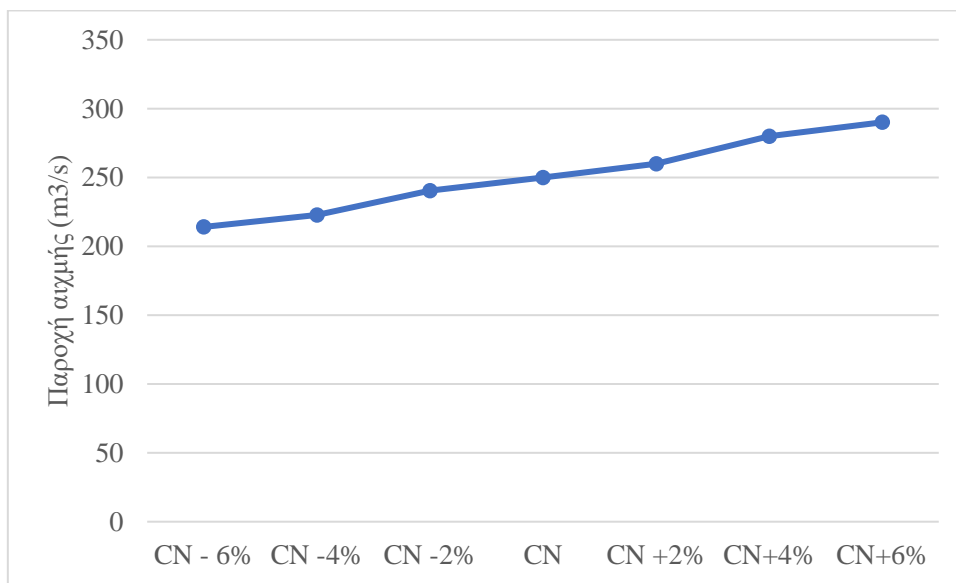
Στη συνέχεια παρατίθενται η ποσοστιαία μεταβολή της παροχής αιχμής με βάση τις μεταβολές της παραμέτρου που αναφέρθηκαν παραπάνω για τη μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder σύμφωνα με τον Πίνακα 5.3. Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά πλημμυρογράφημα καθώς και η μεταβολή της παροχής αιχμής για κάθε μεταβολή σύμφωνα με τα Σχήματα 5.3 και 5.4 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.3: Βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμυρογραφημάτων για ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN μέσω της μεθόδου του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

	Q _{max} (m ³ /s)	t _{Qmax} (h)	ΔQ (%)
CN - 6%	214.1	12	-14.39
CN -4%	222.8	12	-10.92
CN -2%	240.4	11	-3.88
CN	250.1	11	0.00
CN +2%	259.9	11	+3.92
CN+4%	279.9	11	+11.92
CN+6%	290.1	11	+15.99



Σχήμα 5.3: Πλημμυρογραφήματα στο σημείο εξόδου της περιοχής μελέτης για ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN μέσω της μεθόδου του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 5.4: Παροχή αιχμής για ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN μέσω της μεθόδου του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρείται ότι αύξηση της παραμέτρου CN ισοδυναμεί με αύξηση της παροχής αιχμής και μείωση του όγκου των απωλειών. Επίσης, τυχόν μεταβολή της παραμέτρου έχει ως αποτέλεσμα αισθητή διαφοροποίηση της παροχής αιχμής. Για τις ποσοστιαίες μεταβολές της παραμέτρου ο χρόνος αιχμής παράμεινε σταθερός στις 8 h μέσω της μεθόδου Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη ενώ με την μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder ο χρόνος αιχμής είναι στις 11 h εκτός των ποσοστιαίων μεταβολών -4% και -

6% που είναι 12 h. Όσον αφορά την αναλογικότητα των παροχών αιχμής δεν κρίνεται τόσο ικανοποιητική στην περίπτωση της μεταβολής της παραμέτρου CN κατά 4% σε σχέση μ' αυτή του 2% επειδή απέχει κατά δυο μονάδες η παράμετρος CN σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεταβολές που απέχουν μεταξύ τους κατά μια μονάδα. Αντίθετα, σύμφωνα με τον (Μανδραβέλλος 2022) η μεταβολή των αιχμών παρουσιάζει τέλεια αναλογικότητα καθώς με πολύ μεγαλύτερες παροχές αιχμής μικρές μεταβολές των παροχών αιχμής δεν αλλάζουν σε σημαντικό βαθμό την μεταβολή τους.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου στην περιοχή μελέτης. Αρχικά, υλοποιήθηκε η γεωμορφολογική ανάλυση της περιοχής μέσω του προγράμματος ArcGIS και της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. Έπειτα, ακολούθησε η υδρολογική ανάλυση της περιοχής μελέτης μέσω του λογισμικού HEC-HMS αξιοποιώντας δυο διαφορετικές μεθόδους: τη μέθοδο Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη και του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder. Έγινε θεώρηση συγκεντρωτικού μοντέλου λεκάνης απορροής δηλαδή η περιοχή μελέτης αντιμετωπίστηκε ως μια ενιαία οντότητα. Τα αποτελέσματα των μεθόδων αυτών ήταν η παραγωγή πλημμυρογραφήματος για κάθε μια μέθοδο. Η εκτίμηση των απωλειών βροχής πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου SCS CN με την κατανομή της βροχόπτωσης να υλοποιείται μέσω της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ. Επίσης, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου των εναλλασσόμενων μπλοκ καθώς και της δυσμενέστερης διάταξης μέσω της μεθόδου του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη. Στη συνέχεια, με το πρόγραμμα HEC-RAS υλοποιήθηκε η υδραυλική προσομοίωση κατάντη της περιοχής μελέτης όπου βρίσκεται ο οικισμός του Μουζακίου. Αποτέλεσμα της υδραυλικής προσομοίωσης ήταν ο υπολογισμός του βάθους ροής καθώς και της ταχύτητας του πλημμυρικού πεδίου. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας με την μέθοδο «Once at a time» για την παράμετρο CN ώστε να παρατηρηθεί αν η μεταβολή της επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα.

6.2 Γενικά συμπεράσματα

Με την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας στην περιοχή μελέτης εξάγονται τα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Η ορθότητα των αποτελεσμάτων με βάση την παραπάνω μεθοδολογία συσχετίζεται με το πλήθος αλλά και την ακρίβεια των διαθέσιμων δεδομένων όπως επίσης και από την ρύθμιση κάποιων παραμέτρων. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η κατάλληλη επιλογή της τιμής της παραμέτρου η οποία ανήκει σε ένα εύρος τιμών.
- Οι χρήσεις γης παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στα εξαγόμενα αποτελέσματα. Αποτελούν παράμετρο τόσο των υδρολογικών απωλειών όσο και των παραγόμενων τιμών του συντελεστή Manning στο στάδιο της υδραυλικής προσομοίωσης. Επομένως γίνεται αντιληπτό πόσο καταλυτικό ρόλο παίζουν οι χρήσεις γης στα διάφορα στάδια της μεθοδολογίας και η μεγάλη σημασία στην ποιότητα και την ακρίβεια των δεδομένων αυτών.
- Τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου. Αρχικά, η ανάλυση του DEM διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο καθώς ένα αδρό DEM δεν μπορεί να αποτυπώσει με ακρίβεια τη

γεωμετρία του υδατορεύματος και πιθανότατα να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα (Δεβελέκου 2020). Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο συντελεστής τραχύτητας εδάφους (συντελεστής Manning) επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ποικίλες αναφορές για τις τιμές αυτών όμως παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις. Ανάλογα με την εμπειρία του ο μελετητής θα επιλέξει αυτή που θεωρεί καταλληλότερη με την επιλογή του να επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

6.3 Ειδικά συμπεράσματα

Με την εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας στην περιοχή μελέτης εξάγονται τα εξής ειδικά συμπεράσματα:

- Η μέθοδος του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη είναι αναλυτικότερη σε σχέση με την μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder για την εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος καθώς παρέχει την δυνατότητα εισαγωγής ακριβέστερων χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής. Η μέθοδος του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder θεωρείται ότι υποεκτιμά την πλημμυρική αιχμή και παρουσιάζει μια χρονική υστέρηση στην πλημμυρική αιχμή σε σχέση με τα αποτελέσματα της μεθόδου του Ορισμένου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος από τον Χρήστη στην συγκεκριμένη περίπτωση.
- Η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης εμφανίζει μικρότερη παροχή αιχμής και χρόνο αιχμής σε σχέση με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ γιατί οι απώλειες βροχής εμφανίζονται πιο γρήγορα. Η μέθοδος της δυσμενέστερης διάταξης είναι δυσμενέστερη ως προς τον χρόνο αιχμής του πλημμυρογραφήματος της που είναι μικρότερος σε σχέση με την μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ.
- Τα βάθη ροής σε κάποια σημεία του ποταμού ξεπερνούν τα 3 m και αντιστοίχως οι ταχύτητες ροής τα 6 m/s και με τις δυο μεθόδους. Μεγάλες τιμές των βαθών ροής καθώς και των ταχυτήτων ροής παρατηρούνται στα σημεία του ποταμού που βρίσκεται κοντά ο οικισμός του Μουζακίου.
- Κρίσιμη παράμετρος θεωρείται αυτή των υδρολογικών απωλειών μέσω της μεθόδου SCS - CN. Σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου ακόμα και μικρή μεταβολή της επιδρά σε σημαντικό βαθμό στον χρόνο ανόδου ειδικά με τη μέθοδο του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος κατά Snyder και στην παροχή αιχμής και με τις δυο μεθόδους.
- Όσον αφορά τις παροχές αιχμής για ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου CN η αναλογικότητά τους κρίνεται σχετικά ικανοποιητική.

6.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση την παρούσα διπλωματική εργασία, γίνονται οι ακόλουθες προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Εφαρμογή του κατανεμημένου μοντέλου (distributed model) καθώς και του ημικατανεμημένου (semi-distributed model) για την περιοχή μελέτης της εργασίας και σύγκρισή των αποτελεσμάτων με το συγκεντρωτικό μοντέλο (lumped model). Με την εφαρμογή των μοντέλων αυτών αναμένονται ακριβέστερα αποτελέσματα καθώς λαμβάνουν υπόψιν επιπλέον ανομοιομορφίες των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης αλλά θα είχε και ενδιαφέρον τυχόν αδυναμίες τους.
- Η βαθμονόμηση (calibration) ορισμένων παραμέτρων ειδικά των υδρολογικών απωλειών που όπως αναφέρθηκε είναι πολύ σημαντική. Έπειτα, μέσω της επαλήθευσης (validation) είναι δυνατόν να διαπιστωθεί αν η τιμή των υδρολογικών απωλειών είναι αντιπροσωπευτική και να υπάρξει βελτίωση της ακρίβειας των επιλεγθέντων τιμών σε σχέση με τις αρχικές.
- Η επιλογή συγκεκριμένων ιστορικών επεισοδίων βροχής με σκοπό την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας και την σύγκρισή τους με υπάρχοντες πλημμυρικούς χάρτες.
- Η χρήση διαφορετικού λογισμικού από το HEC-HMS για την υδρολογική ανάλυση της περιοχής με δυνατότητα σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων.
- Με τη χρήση του λογισμικού HEC-RAS να γίνει ο υπολογισμός του όγκου των φερτών υλικών τα οποία αποτελούν μέρος των απορροών και στα οποία οφείλεται η αύξηση των παροχών αιχμών.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Διεθνής Βιβλιογραφία

Burrough, P. A., & MacDonnell, R. A. (2000). Principles of geographical information systems. Oxford: Oxford Univ. Press.

Campbell, J.; et al. (2008). "[Photosynthetic Control of Atmospheric Carbonyl Sulfide During the Growing Season](#)". *Science*. **322** (5904): 1085–1088. [Bibcode:2008Sci...322.1085C](#). [doi:10.1126/science.1164015](#). [PMID 19008442](#). [S2CID 206515456](#).

Chang, K.T. (2003). Introduction to geographic information systems. Boston, MA: McGraw-Hill.

Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York, 572.

Dooge, J., C., 1959. A general theory of the unit hydrograph. Journal of geophysical research, 64(2), pp.241-256.

DPWH-JICA. 2003. Manual on Flood Control Planning. Retrieved August 1, 2017 from:https://www.jica.go.jp/project/philippines/0600933/04/pdf/Manual_on_FC_Planning.pdf

Ernst Gabathuler, Sandra Eckert, Albrecht Ehrensperger, F. B. (2012). Mapping and Geoprocessing Tools in Support of Rural Advisory Systems (Issue January).

Feldman, A. (2000). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual". US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.

Goodchild, M.F. 1985. Geographie information systems in undergraduate geography: a contemporary dilemma. Operation Geographer: 34-38.

Inglezakis, V. J., & Menegaki, A. N. (2016). Hydrological Cycle Floral Species in Pollution Remediation and Augmentation of Micrometeorological Conditions and Microclimate.

Koutsoyiannis D., Kozonis D., & Manetas A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. Journal of Hydrology 206.

McCuen R.H. (1998) Hydrologic Analysis and Design, 2nd Edition.

McCuen, R., H., 1989. Hydrologic analysis and design. Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs.

Osti, R. (2004), "Community participation and agencies role for the implication of water induced disaster management; protecting and enhancing the poor", Disaster Prevention and Management, Vol. 13 No. 1, pp. 6-12.

Pannell, D. J. (1997). "[Sensitivity Analysis of Normative Economic Models: Theoretical Framework and Practical Strategies](#)" (PDF). *Agricultural Economics*. **16** (2): 139–152. doi:[10.1016/S0169-5150\(96\)01217-0](https://doi.org/10.1016/S0169-5150(96)01217-0)

Papaioannou G., Efstratiadis A., Vasiliades L., Loukas A., Papalexiou S. M., Koukouvinos A., Kossieris P. (2018). An Operational Method for Flood Directive Implementation in Ungauged Urban Areas. *Hydrology*, 5(2).

Saghafian, B., Julien, P. and Rajaie, H., 2002. Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrone technique. *Journal of Hydrology*, 261(1-4), pp.193-203.

Saltelli, A.; Ratto, M.; Andres, T.; Campolongo, F.; Cariboni, J.; Gatelli, D.; Saisana, M.; Tarantola, S. (2008). *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons.

Scharffenberg, W.A., Fleming, M.J., *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual*, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, version 3.5, August 2010.

Sherman L.K. (1932) Streamflow from Rainfall by the Unit-graph Method, *Engineering News Record*, 108.

Strahler, A., N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), pp.913-920.

Theochari, A. P., Develekou, M., & Baltas, E., 2021, GIS-Based Multi-criteria Approach Towards Sustainability of Flood-Susceptible Areas in Giofiros River Basin, Greece. *Circular Economy and Sustainability*, 1-12.

U.S. Army Corps of Engineers (2016) *River Analysis System HEC-RAS. User's Manual*, Version 5.0., U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, USA.

van Tiel, M., Stahl, K., Freudiger, D., & Seibert, J. (2020). Glacio-hydrological model calibration and evaluation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(6). From : <https://doi.org/10.1002/wat2.1483>.

Wilson E.M. (1990) *Engineering Hydrology*, Palgrave, London.

WWAP (2006), *UN World Water Development Report, World Water Assessment Programme-WWAP*, Paris.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ανδρικοπούλου Θ. (2021) Ανάπτυξη και συγκριτική αξιολόγηση ενός καταναμημένου μοντέλου βροχής-απορροής με χρήση μεθόδων GIS, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Αυγερός Γ. (2020) Βελτίωση και επέκταση αρδευτικών δικτύων δήμου λιμνης πλαστηρα.

Γινόπουλος Ζ. (2012) Πρόληψη και Διαχείριση Πλημμυρικών Κινδύνων από Τσουνάμι και Μετεωρολογική Παλίρροια στην Παράκτια Ζώνη, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη.

Δεβελέκου Μ. (2020) Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου στο βορειοδυτικό τμήμα της περιφερειακής ενότητας ηρακλείου, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Δρόσου Αθ. (2015), Κατάρτιση πλημμυρικών χαρτών στον Αραχθο ποταμό, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Επιχειρησιακό πρόγραμμα Δήμου Μουζακίου 2014-2019 (2015) , Διαθέσιμο από: <http://www.mouzaki.gr/index.php/efimerida/diavoulefseis/1475-2014-2019>

ΕΣΥΕ, 1991. Πραγματικός πληθυσμός, επιφάνεια και πυκνότητα του πληθυσμού, με διάκριση σε αστικές και αγροτικές περιοχές καθώς, και σε πεδινές, ημιορεινές και ορεινές περιοχές της Ελλάδος κατά νομούς, δήμους, δημοτικά διαμερίσματα και οικισμούς. Απογραφή πληθυσμού της 17ης Μαρτίου 1991. Αθήνα.

ΕΣΥΕ, 2001. Πραγματικός πληθυσμός, επιφάνεια και πυκνότητα του πληθυσμού, με διάκριση σε αστικές και αγροτικές περιοχές καθώς, και σε πεδινές, ημιορεινές και ορεινές περιοχές της Ελλάδος κατά νομούς, δήμους, δημοτικά διαμερίσματα και οικισμούς. Απογραφή πληθυσμού της 18ης Μαρτίου 2001. Αθήνα.

ΕΣΥΕ, 2011. Πραγματικός πληθυσμός, επιφάνεια και πυκνότητα του πληθυσμού, με διάκριση σε αστικές και αγροτικές περιοχές καθώς, και σε πεδινές, ημιορεινές και ορεινές περιοχές της Ελλάδος κατά νομούς, δήμους, δημοτικά διαμερίσματα και οικισμούς. Απογραφή πληθυσμού της 10ης Μαΐου 2011. Αθήνα.

Ευστρατιάδης Α., Ρόζος Ε., & Κουκουβίνος Α., (2009). Υδρόγειος: Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης-Θεωρητική τεκμηρίωση.

Καββαδά Θ. (2012), Ανάλυση μεθόδων βροχής-απορροής σε υδρολογικά μοντέλα με χρήση ΣΓΠ, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Κάβουρας, Δάρρα, Κονταξάκη, & Τομαή. (2016). Επιστήμη Γεωγραφικής Πληροφορίας-Αρχές Και Τεχνολογίες, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ για τη θέσπιση πλαισίου με στόχο την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας και για την τροποποίηση του κανονισμού (ΕΕ) 2018/1999 (ευρωπαϊκός νόμος για το κλίμα) 4.3.2020.

Κουτσογιάννης Δ. (2010). Υδρολογική μελέτη ισχυρών βροχοπτώσεων στη λεκάνη του Κηφισού. Αθήνα.

Κουτσογιάννης, Δ. 1988. Υδρολογική διερεύνηση του υδατικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, Τεύχος 7, Τελική έκθεση, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα.

Μαμάσης Ν. (2007) Εκπαιδευτικό Υλικό Μαθήματος Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά Έργα, Δ.Π.Μ.Σ. Ε.Τ.Υ.Π., Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Μαμάσης Ν. (2009) Υδρολογικά μοντέλα και εφαρμογές, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις. Αθήνα: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων.

Μανδραβέλος Ν. (2022) ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟΥ ΒΡΟΧΗΣ-ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 2020 ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΛΗΛΑΝΤΑ ΕΥΒΟΙΑΣ, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Μιμίκου και Μπαλτάς, 2012, Τεχνική Υδρολογία, 5η έκδ, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

Μπαλτάς 2020 , Παρουσίαση στο μάθημα << Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά έργα >> του ΔΠΜΣ << Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων >> , Ε.Μ.Π.

Μπενέκου Π. (2014) Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS στην ορεινή πειραματική λεκάνη Βαρετάδας Αμφιλοχίας, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2007 για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης 6.11.2007: L 288: 27 - 34.

Παράρτημα Ι κυριότερα χαρακτηριστικά της Περιφέρειας Θεσσαλίας 2014-2020, Αθήνα, Διαθέσιμο από: https://www.thessalia-espa.gr/images/files/2014-2020/4_Parartima_Anptyxiaka.pdf

Σκοπελίτη Α. & Στάμου Λ., 2006. Παρουσίαση στο μάθημα «Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας, Στάδιο Ι, 1η Φάση, Παραδοτέο 1, Ανάλυση χαρακτηριστικών περιοχής και μηχανισμών πλημμύρας, Τεχνική έκθεση. (2018), Διαθέσιμο από: https://floods.ypeka.gr/egyFloods/gr08/report/GR08_P01_T1.pdf

Τσακίρης Γ., Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική υδρολογία & Εισαγωγή στη Διαχείριση Υδατικών, Αθήνα, 2013.

Υποστήριξη της κατάρτισης Εθνικού Προγράμματος Διαχείρισης και Προστασίας των Υδατικών Πόρων, 2008. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, ΕΜΠ, Αθήνα.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2017) 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Θεσσαλίας (ΕΛ 8).

Χαλκιάς Χ. (2006). Όροι και έννοιες επιστήμης γεωγραφικών πληροφοριών. Αθήνα, Εκδόσεις ΙΩΝ.

Χριστοφίδης Α. (2008) Ανάπτυξη Μοντέλου βροχής – απορροής σε σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Ε.Μ.Π, Αθήνα.

Διαδικτυακές Πηγές

https://ec.europa.eu/clima/climate-change/consequences-climate-change_el, Τελευταία προσπέλαση: 5/2/2022

<https://floods.ypeka.gr/>, Τελευταία προσπέλαση: 5/2/2022

<https://forums.arcgis.com/>, Τελευταία προσπέλαση: 11/1/2022

<https://geodata.gov.gr/>, Τελευταία προσπέλαση: 8/12/2021

<https://land.copernicus.eu/>, Τελευταία προσπέλαση: 10/12/2021

<https://www.arcgis.com/index.html> , Τελευταία προσπέλαση: 9/1/2022

<https://www.eagme.gr/>, Τελευταία προσπέλαση: 11/12/2021

<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>, Τελευταία προσπέλαση: 11/1/2022

<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/> , Τελευταία προσπέλαση 9/2/2022

<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>, Τελευταία προσπέλαση 9/2/2022

<https://www.ktimatologio.gr/el>, Τελευταία προσπέλαση: 8/12/2021

https://www.meteo.gr/weather_cases.cfm, Τελευταία προσπέλαση: 10/3/2022

<https://www.statistics.gr/>, Τελευταία προσπέλαση: 4/3/2022

<https://ypen.gov.gr/>, Τελευταία προσπέλαση: 4/3/2022