ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟΥ ΒΡΟΧΗΣ - ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 2020 ΣΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΛΗΛΑΝΤΑ ΕΥΒΟΙΑΣ

ΜΑΝΔΡΑΒΕΛΛΟΣ Α. ΝΙΚΟΛΑΟΣ

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

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Contents

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ 4

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 5

EXTENDED ABSTRACT 6

Introduction 6

Materials and Methods 6

Study Area 6

Data Used 7

Hydrological Analysis 8

Hydraulic Analysis 11

Results and Discussion 12

Hydrological analysis 12

Hydraulic Analysis 15

Sensitivity Analysis 19

Conclusion 21

Selected References 22

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 23

1.1 Γενικά 23

1.1.1 Η πλημμύρα ως φυσική καταστροφή 23

1.1.2 Κίνδυνος και επικινδυνότητα πλημμυρών 23

1.1.3 Νομοθεσία 24

1.2 Αντικείμενο Μελέτης 27

1.3 Διάρθρωση Εργασίας 28

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ 29

2.1 Φυσικά Χαρακτηριστικά 29

2.1.1 Γεωγραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά 29

2.1.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά 34

2.1.3 Κλιματικά στοιχεία 36

2.2 Ανθρωπογενή Χαρακτηριστικά 38

2.2.1 Διοικητική δομή 38
2.2.2 Πληθυσμός 38
2.2.3 Οικονομία 40
2.2.4 Χρήσεις γης 42
2.3 Ιστορικό Πλημμυρών 44
2.3.1 Ιστορικές πλημμύρες ΖΔΥΚ 44
2.3.2 Μηχανισμοί πλημμύρας στην περιοχή μελέτης 45
2.3.3 Παρατηρήσεις επί των ληφθέντων αντιπλημμυρικών μέτρων στην περιοχή μελέτης 46
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 47
3.1 Περιβάλλοντα Εργασίας 47
3.1.1 Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών – λογισμικό ArcMap 47
3.1.2 Λογισμικό HEC-HMS 49
3.1.3 Λογισμικό HEC-RAS 50
3.2 Γεωμορφολογική Ανάλυση 52
3.2.1 Ορισμός υδρογραφικού δικτύου 52
3.2.2 Ορισμός λεκάνης και υπολεκάνης απορροής 54
3.3 Υδρολογική Ανάλυση 54
3.3.1 Επιλογή και εξαγωγή υπολεκάνης για την υλοποίηση της υδρολογικής ανάλυσης 55
3.3.2 Το μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος 56
3.3.3 Εκτίμηση μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών 59
3.3.4 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder 63
3.3.5 Μέθοδος αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος SCS 65
3.3.6 Μέθοδος Unit Specified Hydrograph (transform method) 68
3.3.7 Υπολογισμός πλημμυρογραφήματος σε περιβάλλον HEC-HMS 68
3.4 Υδραυλική Προσομοίωση 71
3.4.1 Εισαγωγή δεδομένων 71
3.4.2 Υδραυλική προσομοίωση στη θέση ενδιαφέροντος 73
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 78
4.1 Αποτελέσματα Υδρολογικής Ανάλυσης 78
4.1.1 Μέθοδος United Specified Hydrograph (USH) 78

4.1.2 Μέθοδος Snyder 80
4.1.3 Μέθοδος SCS 82
4.1.4 Σύγκριση μεθόδων 84
4.2 Αποτελέσματα Υδραυλικής Ανάλυσης 86
4.2.1 Μέθοδος USH 89
4.2.2 Μέθοδος Snyder 93
4.2.3 Μέθοδος SCS 97
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ CN 101
5.1 Πραγματικές Συνθήκες 101
5.2 Πλημμυρογραφήματα Για Τις Διάφορες Μεθόδους 102
5.2.1 Μέθοδος United Specified Hydrograph (USH) 102
5.2.2 Μέθοδος Snyder 103
5.2.3 Μέθοδος SCS 105
5.3 Μεταβολή Παροχής Αιχμής Για Κάθε Συνθήκη Υγρασίας 106
5.3.1 Μέθοδος USH 107
5.3.2 Μέθοδος Snyder 108
5.3.3 Μέθοδος SCS 110
5.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων 111
5.4.1 Υγρές συνθήκες 111
5.4.2 Κανονικές συνθήκες 112
5.4.3 Ξηρές συνθήκες 112
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 114
6.1 Σύνοψη 114
6.2 Γενικά Συμπεράσματα 114
6.3 Ειδικά Συμπεράσματα 115
6.4 Προτάσεις Για Μελλοντική Έρευνα 116
ΑΝΑΦΟΡΕΣ 117

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ύστερα από την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Μπαλτά, Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος. Ακόμη, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για τη βοήθεια και τις γνώσεις που μου μετέδωσε, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε.

Επίσης, ευχαριστώ 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, μέλη της εξεταστικής επιτροπής, για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν, κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και για τις επισημάνσεις και παρατηρήσεις τους στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Αιμιλία Θεοχάρη, Υποψήφια Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για το χρόνο που διέθεσε, για τη συνεχή υποστήριξη, καθώς και για τις γενικότερες επισημάνσεις και γνώσεις που μου προσέφερε, σε καίρια ζητήματα που προέκυψαν, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους μου από τη Σχολή των Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π, οι οποίοι μου στάθηκαν και με συμβούλεψαν, σε όλα τα χρόνια των σπουδών μας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω μέσα από τη καρδιά μου την οικογένειά μου, για τη συνεχή υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Νικόλαος Α. Μανδραβέλλος
Αθήνα, 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, ολοένα και περισσότερες καταστροφές λαμβάνουν χώρα στην Ελλάδα, λόγω πλημμυρικών φαινομένων. Οι πλημμύρες καθίστανται φυσικά φαινόμενα, τα οποία συχνά έχουν αρνητικές επιπτώσεις τόσο στο φυσικό, όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον. Ο πλήρης περιορισμός των πλημμυρών συνίσταται ιδιαίτερα δύσκολος, καθώς πλαισιώνονται από πολλούς παράγοντες. Ωστόσο, δύναται η πλήρης πρόληψη για την προστασία των ευάλωτων περιοχών, βάσει κατάλληλων σχεδίων διαχείρισης. Η υπό εξέταση περιοχή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βρίσκεται στην περιφερειακή ενότητα της Εύβοιας και συγκεκριμένα στο παραλιακό τμήμα του Βασιλικού Εύβοιας, όπου και εκβάλει ο ποταμός Λήλας. Πρόκειται για λεκάνη απορροής, συνολικής έκτασης 252 km^2. Στόχος της εργασίας, αποτελεί η ανάλυση του πλημμυρικού επεισοδίου της βροχής-απορροής, το οποίο έλαβε χώρα στις 8 Αυγούστου του 2020 στο συγκεκριμένο ποταμό. Σε πρώτο στάδιο, εξετάζεται η περιοχή μελέτης στο περιβάλλον των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), για την εξαγωγή των γεωμορφολογικών και γεωχωρικών δεδομένων της υπό εξέταση περιοχής. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η υδρολογική ανάλυση, εφαρμόζοντας τρεις μεθόδους μετασχηματισμού βροχής σε απορροή βασισμένες στο Μοναδιαίο Υδρογράφημα (ΜΥΓ) χρησιμοποιώντας το λογισμικό Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). Αρχικά επιλέγεται η μέθοδος Unit Specified Hydrograph (USH) σύμφωνα με την οποία εισάγεται στο HEC-HMS το ΜΥΓ της λεκάνης απορροής, το οποίο υπολογίζεται με βάση τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS. Παράλληλα επιλέγονται και οι μέθοδοι του συνθετικού ΜΥΓ κατά Snyder και του αδιάστατου ΜΥΓ κατά Soil Conservation Service (SCS). Το αποτέλεσμα της υδρολογικής ανάλυσης είναι ο υπολογισμός του αντίστοιχου πλημμυρογραφήματος για κάθε μέθοδο στην έξοδο της λεκάνης. Έπειτα, έχοντας ως δεδομένο τα πλημμυρογραφήματα διεξάγεται η υδραυλική προσομοίωση κατάντη της εξόδου με χρήση του λογισμικού River Analysis System (HEC-RAS). Σκοπός της προσομοίωσης είναι η εκτίμηση των μεγίστων βαθών ροής στην έκταση του πλημμυρικού πεδίου, καθώς και των μεγίστων ταχυτήτων ροής. Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πλαισιώνεται από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιείται, για την ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο, που καλείται αριθμός καμπύλης Curve Number (CN) και εισάγεται στην μέθοδο SCS CN για την εκτίμηση των απωλειών. Εξετάζεται το πόσο μεταβάλλονται τα αποτελέσματα, όπως η παροχή αιχμής και ο χρόνος αιχμής, ανάλογα με τη μεταβολή της συγκεκριμένης παραμέτρου. Εν κατακλείδι, προτείνονται και εξετάζονται τρόποι, μέσω των οποίων δύναται η ελαχιστοποίηση των ζητημάτων που προκύπτουν, από τέτοια πλημμυρικά φαινόμενα, βάσει οδηγιών και νομοθεσίας.

Λέξεις – κλειδιά: Πλημμύρα, πλημμυρικό επεισόδιο, λεκάνη απορροής, υπολεκάνη, Εύβοια, Λήλας, ισόχρονες καμπύλες, Snyder, SCS, ArcMap, HE-HMS, HEC-RAS, Ανάλυση ευαισθησίας, Αριθμός καμπύλης CN

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Natural disasters, may have a catastrophic impact on the lives of people and property, in the affected area, where the flood has taken place (Hanak & Korytarova, 2014). Despite, the massive risk efforts and billions of money invested, in flood defenses worldwide, this phenomenon still exists, while floods cause a lot of problems, with huge impact in humanity (Kundzewics, Pińskwar, Brakenridge, 2012). European Union, established the Directive 2007/60 on the assessment and management of flood risks. They produced and developed a flood risk analysis method, so that devastating floods get more efficiently terminated. According to the framework of this Directive, every EU Member, has to follow the instructions, in order to avoid and reduce the impacts of floods.

This diploma thesis aims to analyze the effect of the flood in Vasiliko -Euboea, Central Greece, of the river Lilas, due to the rainfall that took place at the 8th of August in 2020. In the first part of the thesis, the problem is analyzed at the program, called ArcMap, in order to identify the flood areas. Afterwards, the hydrological analysis is performed, based on the method of unit hydrograph theory, method of SCS and method of Snyder, at the HEC-HMS model. The main scope of the hydrological analysis is to produce the flow hydrograph, which is the main input data of the third program that is used, called HEC-RAS. In this case, the flow depth and the maximum flow velocity are produced, which are also shown in the map. Finally, in the last part of this thesis a sensitivity analysis is developed, regarding the main parameter CN, in order to investigate the changes in the results that may happen.

Materials and Methods

Study Area

The study area consists just only one subbasin, which includes the main river, called Lilas, in the island of Euboea. It is located between the longitude 23°35'0''E – 23°56'0''E and the latitude 38°37'30''N – 38°20'0''N. The elevation of the basin ranges from 0.5 m to 1411 m, with mean elevation of 350m. Also, the mean ground slope is 16°, while the land area is about 252 km^{2}. Topographic characteristics of the basin separately are depicted in Table 1.

Table 1: Topographic characteristics of basin of the study area

Area (km^2)	252
Maximum Elevation (m)	1411
Minimum Elevation (m)	0.5
Mean Elevation (m)	350
Mean Slope (^{o})	16

Data Used

The datasets on which the analysis was based are the Digital Elevation Model (DEM), Corine Land Cover (2012) and the DEM – derived geomorphological and hydrological attributes, such as the slope and streams definition. The Digital Elevation Model (DEM) of the basin, that is provided by the National Cadaster & Mapping Agency of Greece and is a raster layer with pixel size equal to 5 x 5 m. Its geometric accuracy is RMSEz ≤ 2.00 m and the absolute accuracy is about 3.92 m for a 95 % confidence level. DEM, along with the stream network of the study area is depicted in Figure 1.

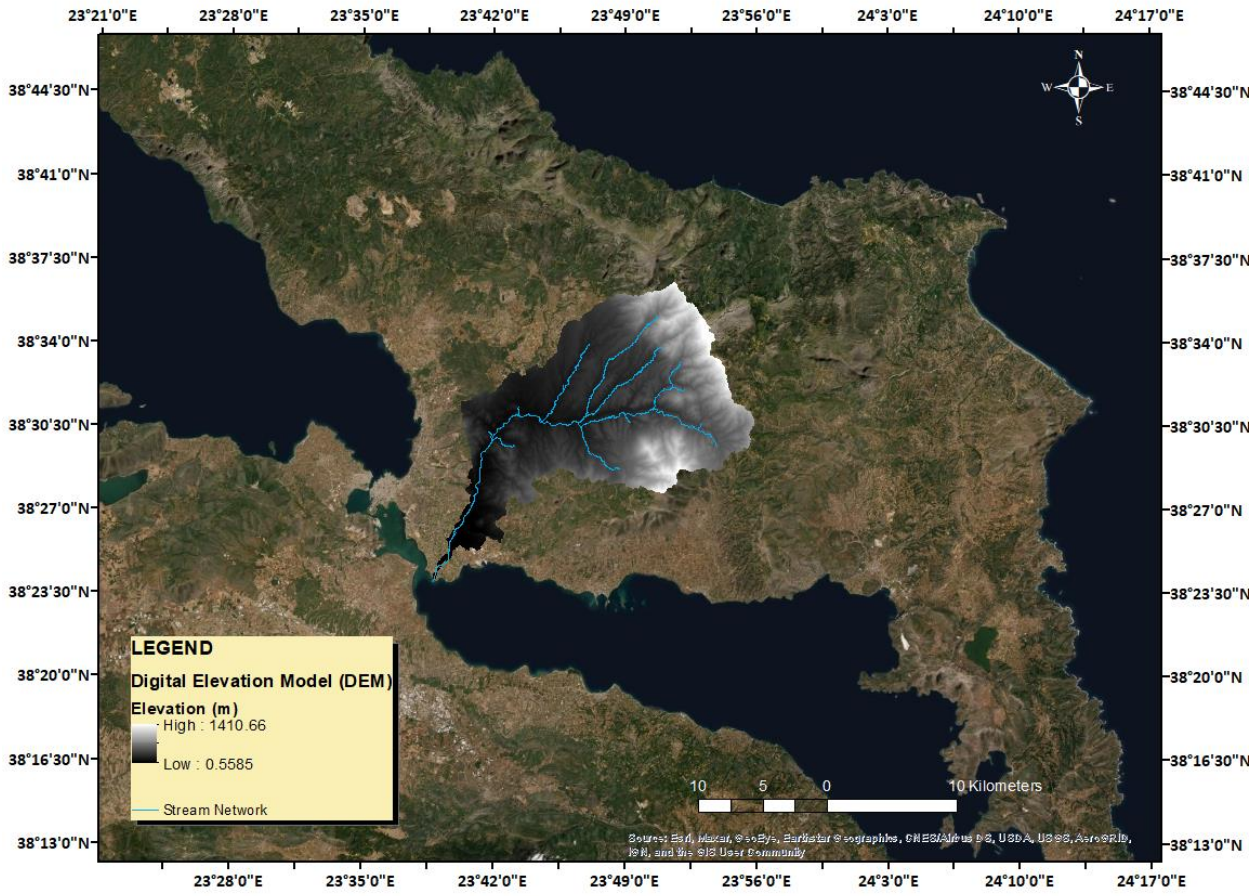


Figure 1: Digital Elevation Model (DEM) and stream network of the study area

Hydrological Analysis

Hydrological analysis is based on the unit hydrograph theory. In order to get the unit hydrograph determined, the following methods are applied. Firstly, the Unit Specified Hydrograph method (time – area diagram), which is mainly executed in the ArcMap program. Secondly, the SCS method and the Snyder method.

The time – area diagram method is used to determine the Unit Hydrograph of the subbasin. This method is mainly executed in the ArcMap environment. Through that, watershed areas, which contribute to runoff at the watershed outlet, are produced, with basic parameter the time of travel. Those areas are connected with the iscochrones curves. An isochrone curve means that all points, being at this curve, end up at the outlet at the same time. The isochrones cannot cross one another, since every isochrone curve is unique, with specific time of travel (Singh, 1992). The chart of the method is depicted in Figure 2.

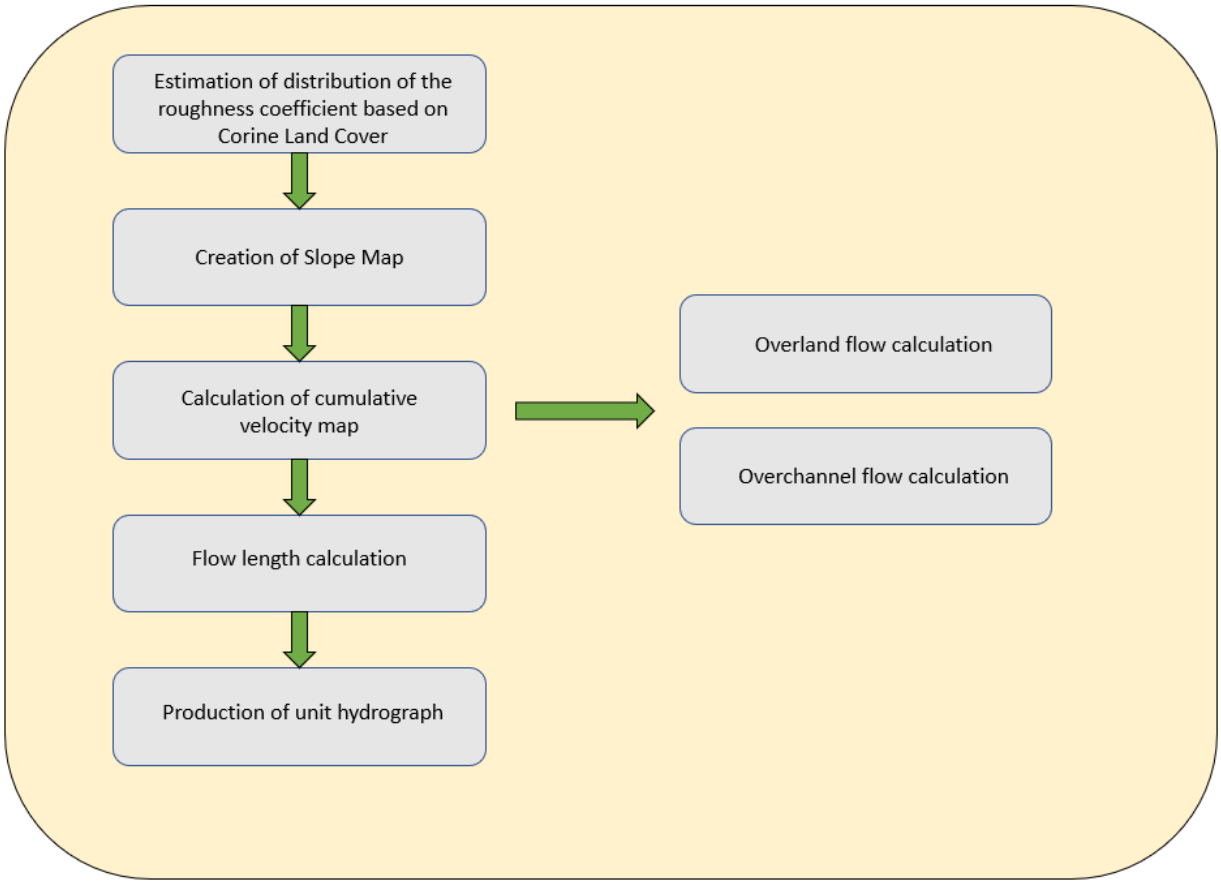


Figure 2: Production of Unit Hydrograph using time-area diagram method

Also, rainfall data are required to estimate the discharge at the outlet of the basin, and after that the flood hydrograph. The total precipitation volume was 294 mm, while the duration of precipitation was about 8 hours. The applied design precipitation is presented in Figure 3.

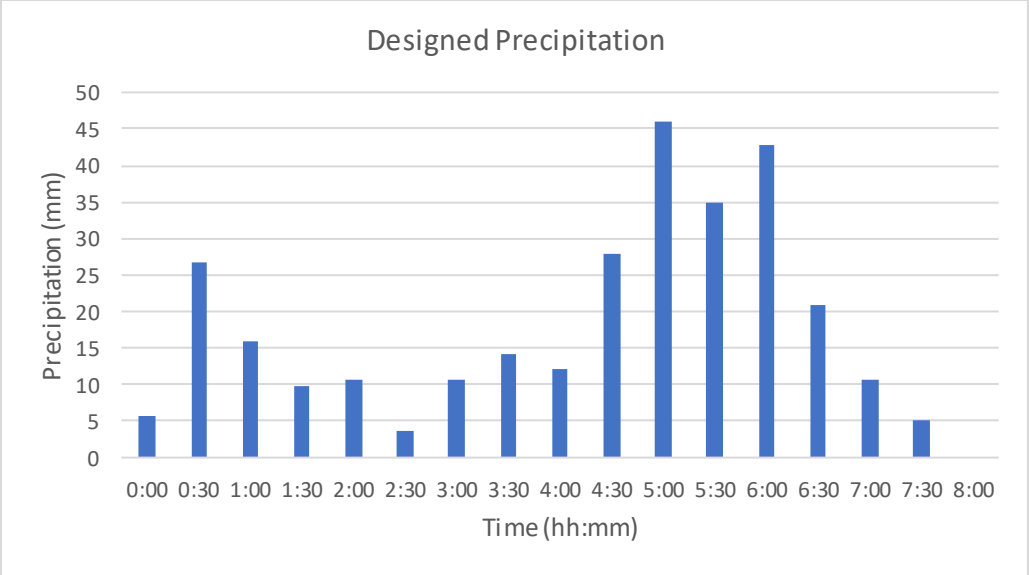


Figure 3: Design precipitation based on National Meteorological Service

Furthermore, two more methods are used, so that the hydrological analysis get done. Those are the SCS method and the Snyder method.

Regarding the first one, through this method the net rainfall that accounts for the direct runoff is calculated. The Curve Number (CN) was developed by the USDA Natural Resources Conservation Service, and this parameter is used, so that the direct runoff or the infiltration of the rainfall get estimated. The CN is calculated, through tables, and it depends on the soil permeability, the land use (Land Cover) and the previous humidity conditions.

Concerning the second one, the unit hydrograph of Snyder is based on relationships found, between three characteristics of a standard unit hygrograph and descriptors of basin morphology. The hydrograph characteristics are the effective rainfall duration, the peak direct runoff rate and the basin lag time (Ramirez, 2011).

All the above methods are executed in the environment of the HEC-HMS4.8 program. Basically, they are used on the subbasin, and more specifically at the simulation point, in order to produce the flow hydrograph, which is the main input data of the hydraulic analysis. So, the topographic characteristics of the subbasin, are depicted in Figure 3, while they are analyzed in the Table 2 too.

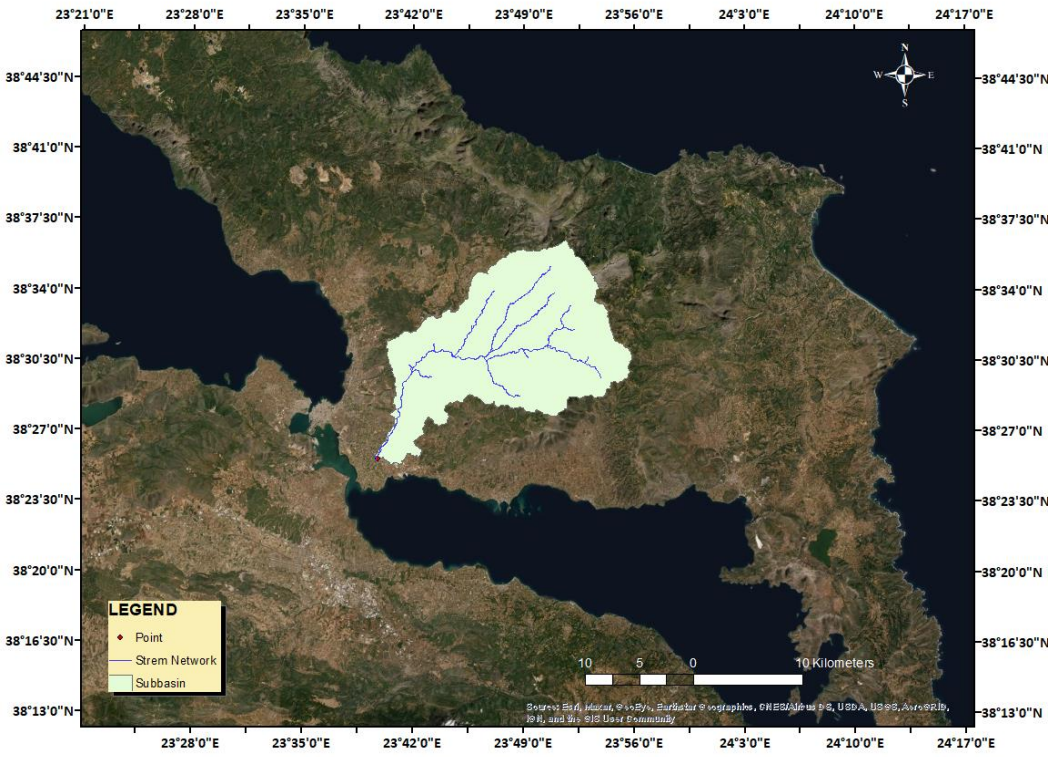


Figure 4: Subbasin, Stream Network and Simulation Point of the hydrological analysis

Table 2: Topographic characteristics of the subbasin of the study area

Area (km^2)	251
Maximum Elevation (m)	1411
Minimum Elevation (m)	10
Mean Elevation (m)	351
Mean Slope (^{o})	21

After the production of the flow hydrograph, the next step is the hydraulic simulation, which is necessary for this thesis.

Hydraulic Analysis

First of all, hydraulic analysis takes place at the simulation point. The area upstream of that point, is the main area of the hydrological analysis, through the environment of the HEC-HMS4.8 program. In the other hand, the hydraulic simulation is conducte d, by the HEC-RAS 5.0.7 program. In the context of the integrated approach of the analysis of the flood that took place, the hydraulic simulation is attempted in the simulation point in the basin, which includes the river called Lilas. Concerning the specific thesis, the HEC-RAS is used for 2D simulation and for unsteady flow hydraulics computations. Regarding those computations, the user takes advantage

of the equations of Saint – Venant, using the implicit finite difference approach through the computational Box Scheme (U.S. Army Corps of Engineers, 2016).

The terrain, which was defined by the Digital Elevation Model (DEM), input feature of 5 x 5 m pixel size resolution, the stream network and the land use are imported to the program. The land use is based on the Corine Land Cover (2012), so that to get the Manning values determined. Additionally, a super necessary factor is the determination of the boundary conditions. As an upper condition, the corresponding flood hydrograph is imported. Regarding the downstream conditions at the outlet, the maximum depth is imported.

Results and Discussion

Hydrological analysis

First of all, the creation of the Unit Hydrograph of the study area is considered to be necessary. It is produced, through the method of isochrones curves, as already mentioned. The unit hydrograph is shown in the Figure 4.

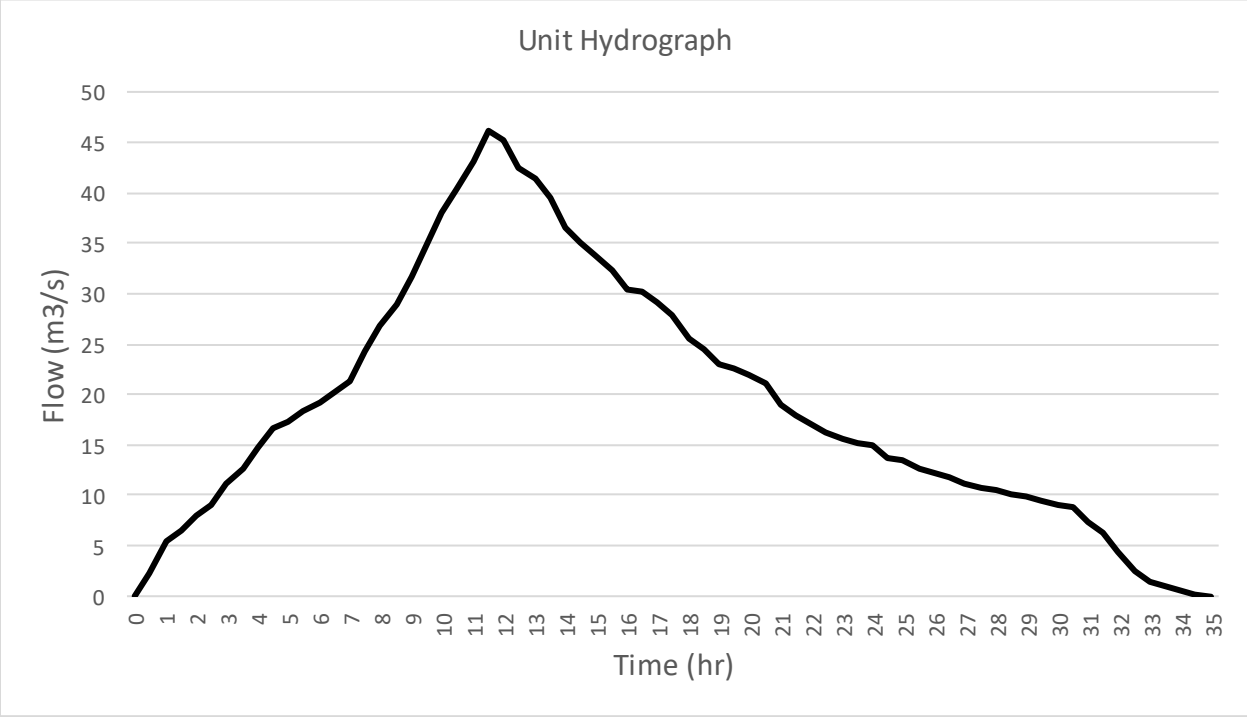


Figure 5: Unit hydrograph of the basin through the method of isochrones curves

Afterwards, the production of the flood hydrographs, for the examined area (252 km^2), are needed. These hydrographs are created, through the three main methods, that have already been mentioned. The Snyder method, the SCS method and the Unit Specified Hydrograph method.

The results for all three methods, taking into consideration all of the humidity conditions (wet, normal, dry), are produced and depicted in Figures 5, 7, 9. Plus, the characteristics of the flood hydrographs are shown in the Figures 6, 8, 10.

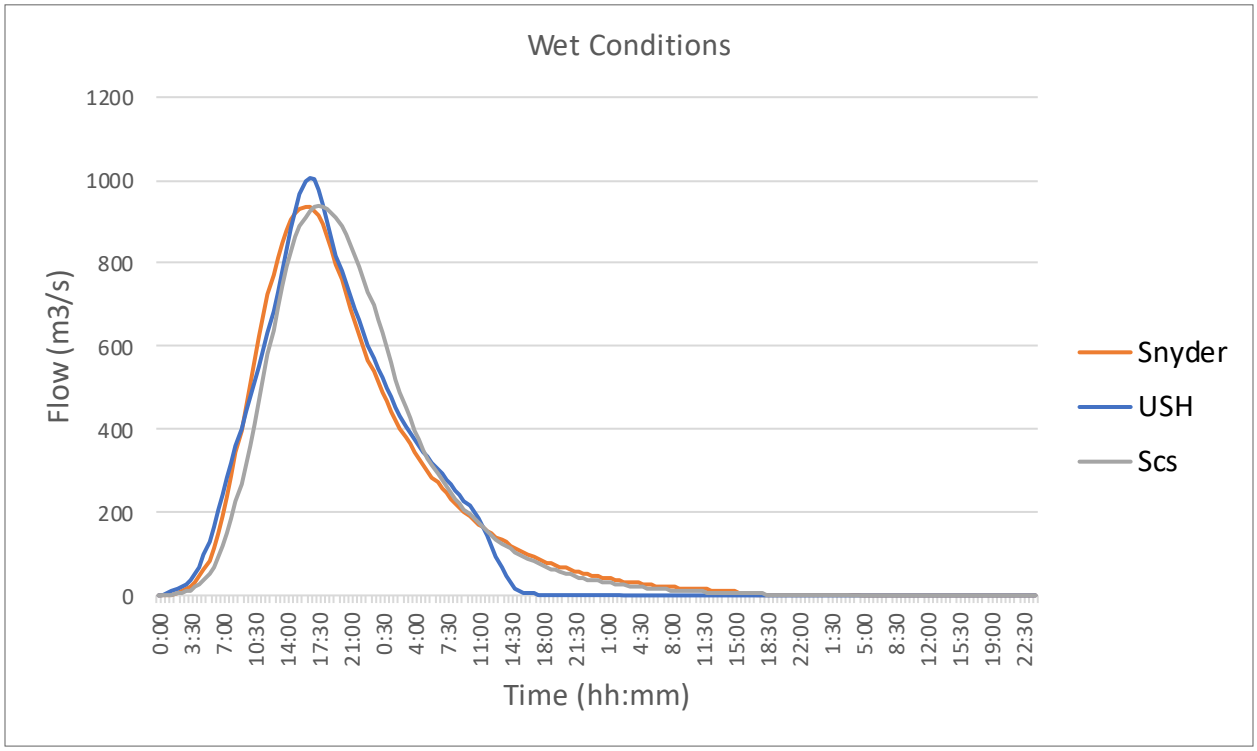


Figure 6: Flood hydrograph by the three methods (USH, Snyder and SCS) at the point of simulation of the basin for wet conditions

Regarding the wet conditions, the peak discharge for the Snyder method is about 936 m^3/s, for the SCS method is 938 m^3/s and finally the peak discharge for the USH method is 1005 m^3/s.

USH	
Peak Discharge (m3/s)	1005.3
Percipitation Volume (mm)	293.8
Loss Volume (mm)	47.69
Excess Volume (mm)	246.11
Date/Time of Peak Discharge	08Aug2020, 16:30
Direct Runoff Volume (mm)	237.24
Baseflow Volume (mm)	0
Discharge Volume (mm)	237.24

SNYDER	
Peak Discharge (m3/s)	935.6
Percipitation Volume (mm)	293.8
Loss Volume (mm)	47.69
Excess Volume (mm)	246.11
Date/Time of Peak Discharge	08Aug2020, 16:00
Direct Runoff Volume (mm)	246.11
Baseflow Volume (mm)	0
Discharge Volume (mm)	246.11

SCS	
Peak Discharge (m3/s)	938.2
Percipitation Volume (mm)	293.8
Loss Volume (mm)	47.69
Excess Volume (mm)	246.11
Date/Time of Peak Discharge	08Aug2020, 17:30
Direct Runoff Volume (mm)	246.11
Baseflow Volume (mm)	0
Discharge Volume (mm)	246.11

Figure 7: Characteristics of the flood hydrograph for wet conditions

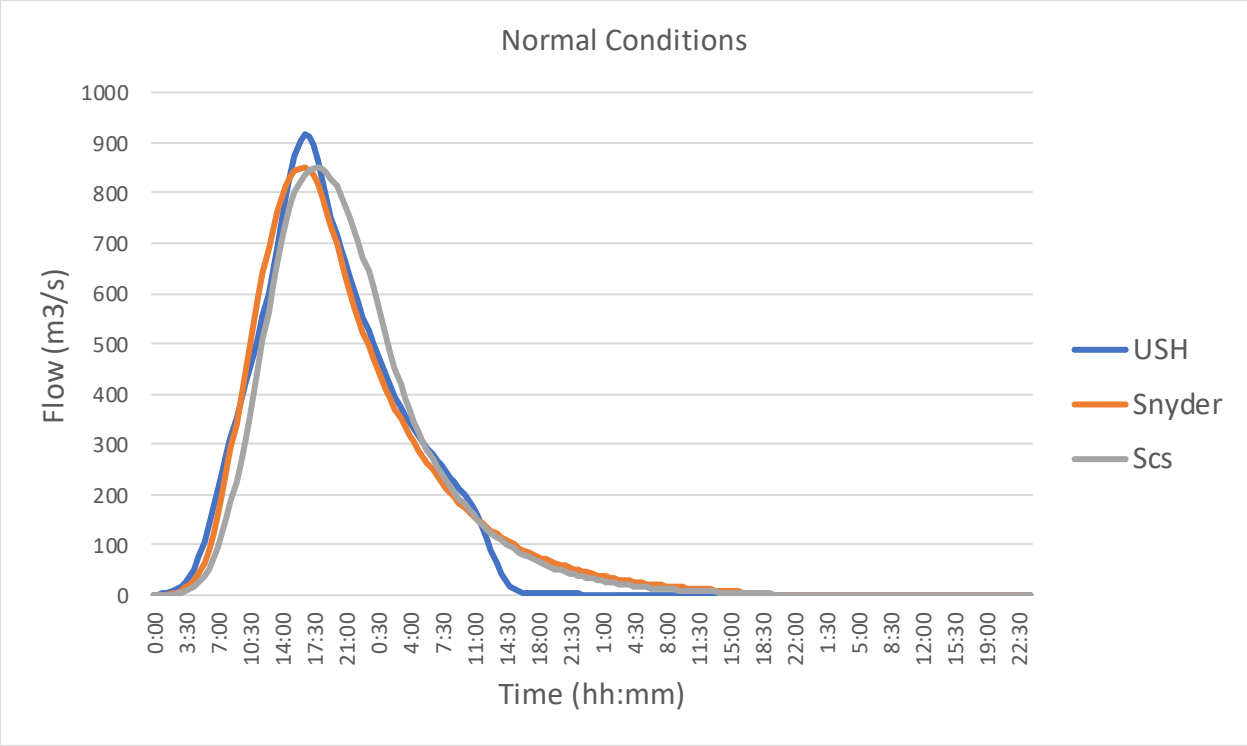


Figure 8: Flood hydrograph by the three methods (USH, Snyder and SCS) at the point of simulation of the basin for normal conditions

For the normal conditions, the peak discharge for the Snyder method is 850 m^3/s, for the SCS method is 850 m^3/s and finally the peak discharge for the USH method is 917 m^3/s.

USH			SNYDER			SCS	
Peak Discharge (m3/s)	916.9		Peak Discharge (m3/s)	850.7		Peak Discharge (m3/s)	850.6
Percipitation Volume (mm)	293.8		Percipitation Volume (mm)	293.8		Percipitation Volume (mm)	293.8
Loss Volume (mm)	71.35		Loss Volume (mm)	71.35		Loss Volume (mm)	71.35
Excess Volume (mm)	222.45		Excess Volume (mm)	222.45		Excess Volume (mm)	222.45
Date/Time of Peak Discharge	08Aug2020, 16:30		Date/Time of Peak Discharge	08Aug2020, 16:30		Date/Time of Peak Discharge	08Aug2020, 18:00
Direct Runoff Volume (mm)	214.43		Direct Runoff Volume (mm)	222.45		Direct Runoff Volume (mm)	222.45
Baseflow Volume (mm)	0		Baseflow Volume (mm)	0		Baseflow Volume (mm)	0
Discharge Volume (mm)	214.43		Discharge Volume (mm)	222.45		Discharge Volume (mm)	222.45

Figure 9: Characteristics of the flood hydrograph for normal conditions

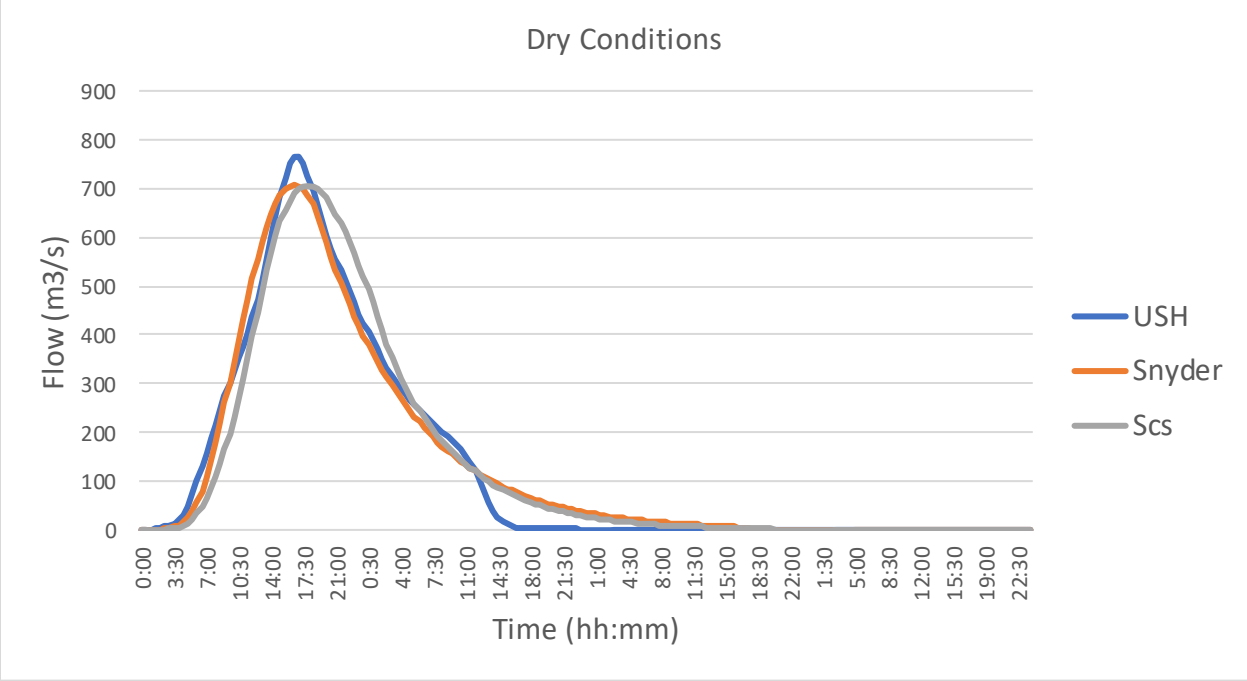


Figure 10: Flood hydrograph by the three methods (USH, Snyder and SCS) at the point of simulation of the basin for dry conditions

Regarding the dry conditions, the peak discharge for the Snyder method is 707 m^3/s, for the SCS method is 705 m^3/s and finally the peak discharge for the USH method is 765 m^3/s.

USH			SNYDER			SCS	
Peak Discharge (m3/s)	765.1		Peak Discharge (m3/s)	707.5		Peak Discharge (m3/s)	704.7
Percipitation Volume (mm)	293.8		Percipitation Volume (mm)	293.8		Percipitation Volume (mm)	293.8
Loss Volume (mm)	110.39		Loss Volume (mm)	110.39		Loss Volume (mm)	110.39
Excess Volume (mm)	183.41		Excess Volume (mm)	183.41		Excess Volume (mm)	183.41
Date/Time of Peak Discharge	08Aug2020, 17:00		Date/Time of Peak Discharge	08Aug2020, 16:30		Date/Time of Peak Discharge	08Aug2020, 18:00
Direct Runoff Volume (mm)	176.8		Direct Runoff Volume (mm)	183.41		Direct Runoff Volume (mm)	183.41
Baseflow Volume (mm)	0		Baseflow Volume (mm)	0		Baseflow Volume (mm)	0
Discharge Volume (mm)	176.8		Discharge Volume (mm)	183.41		Discharge Volume (mm)	183.41

Figure 11: Characteristics of the flood hydrograph for dry conditions

Hydraulic Analysis

The floodplain of the stream network is simulated, through the HEC-RAS 5.0.7 program, for 2D and for unsteady flow. The flood hydrographs are imported to this program, as an upper boundary condition. The results are the maximum depth and maximum velocity of the floodplain of the area that is analyzed.

The results of the hydraulic analysis look like with those of reality, that took place in August 2020. The floodplains caused a lot of damage, since main roads, bridges and other important infrastructures got destroyed. Furthermore, the results show that the flood did not accumulate within the riverbed, but it got spread to the area. The quality of data used (DEM and Manning coefficient) is a decisive factor to an accurate floodplain simulation. In the following figures, the results of the HEC-RAS 5.0.7 are shown, for every method that was used, upon the thesis.

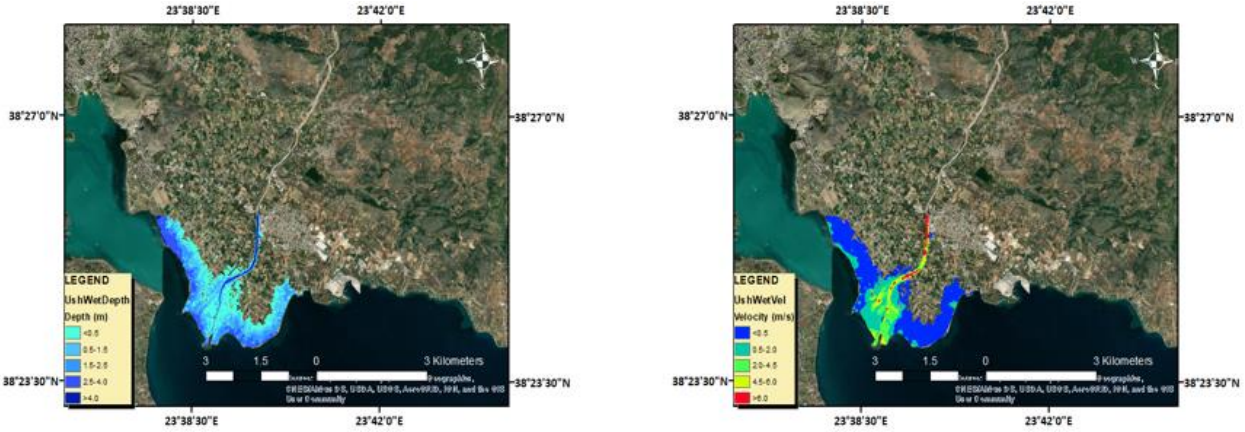


Figure 12: Maximum depth and velocity by the Ush method for wet humidity conditions

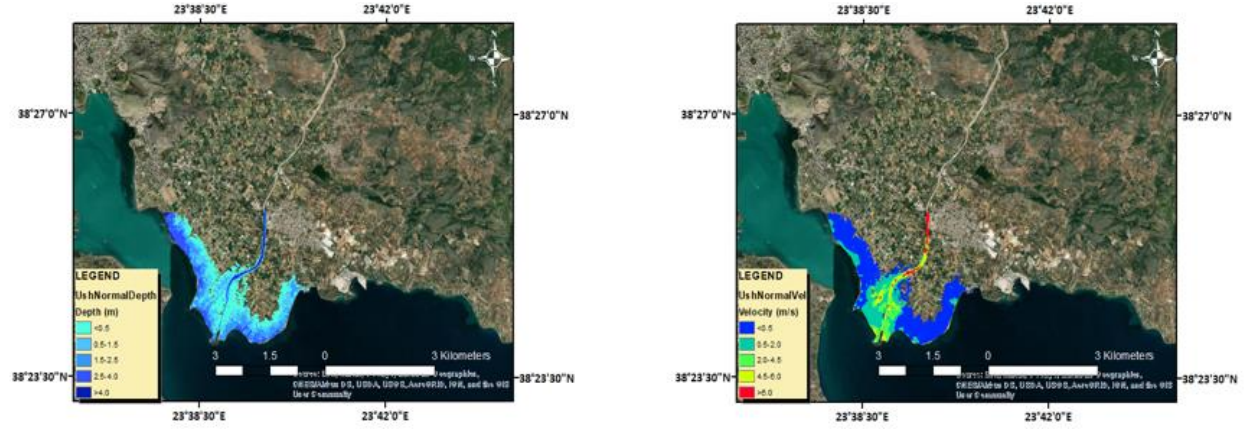


Figure 13: Maximum depth and velocity by the Ush method for normal humidity conditions

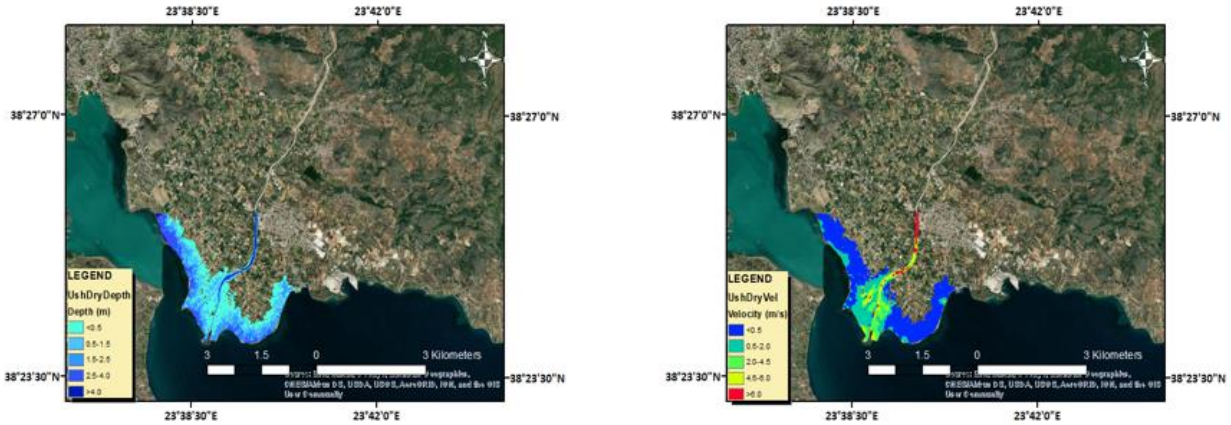


Figure 14: Maximum depth and velocity by the Ush method for dry humidity conditions

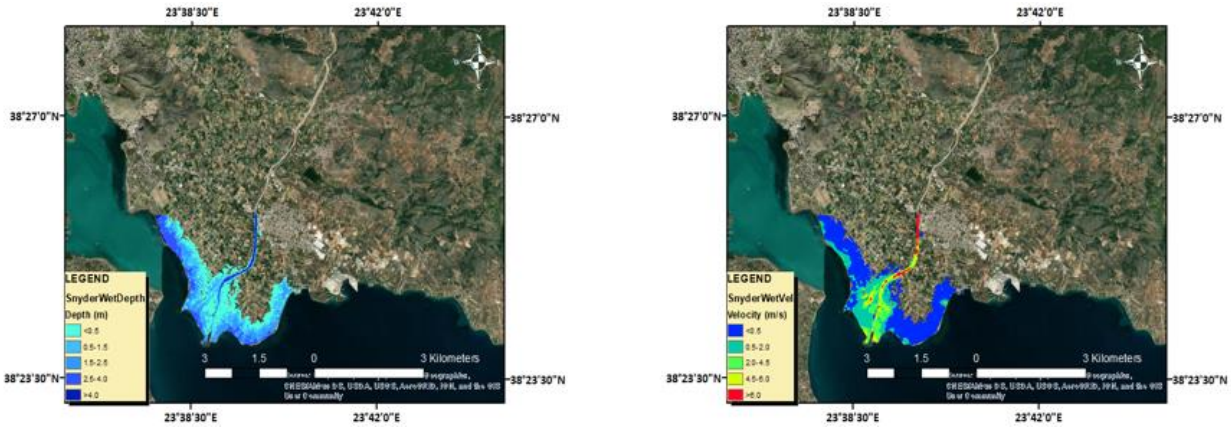


Figure 15: Maximum depth and velocity by the Snyder method for wet humidity conditions

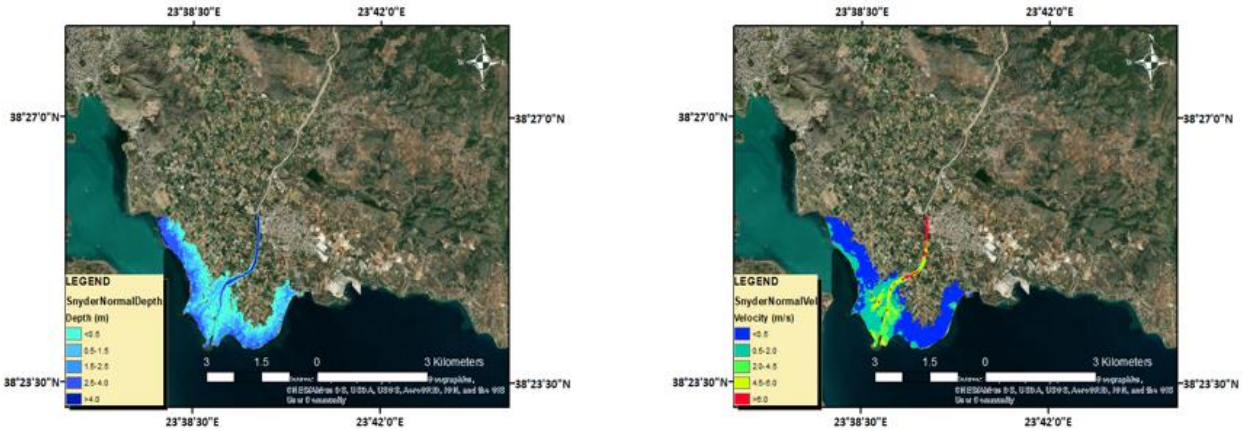


Figure 16: Maximum depth and velocity by the Snyder method for normal humidity conditions

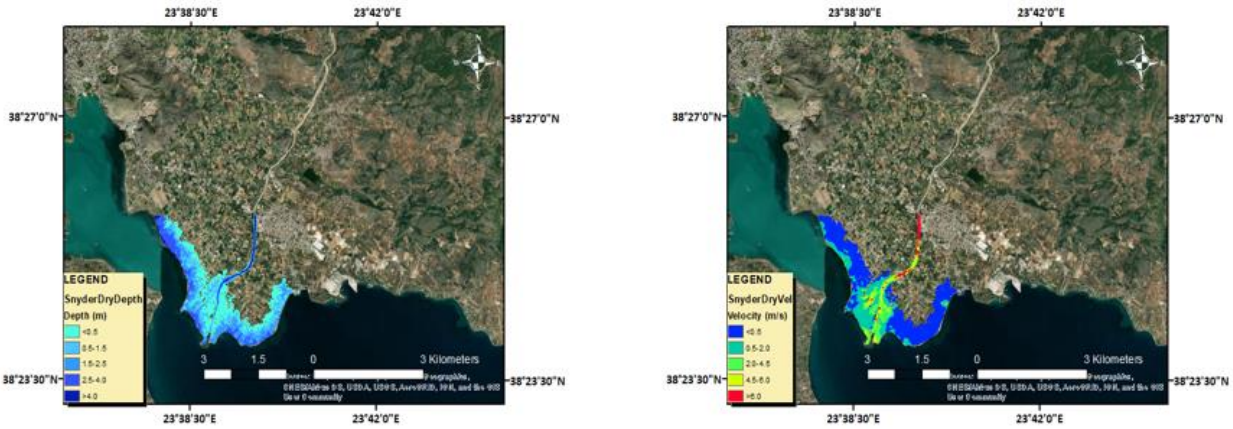


Figure 17: Maximum depth and velocity by the Snyder method for dry humidity conditions

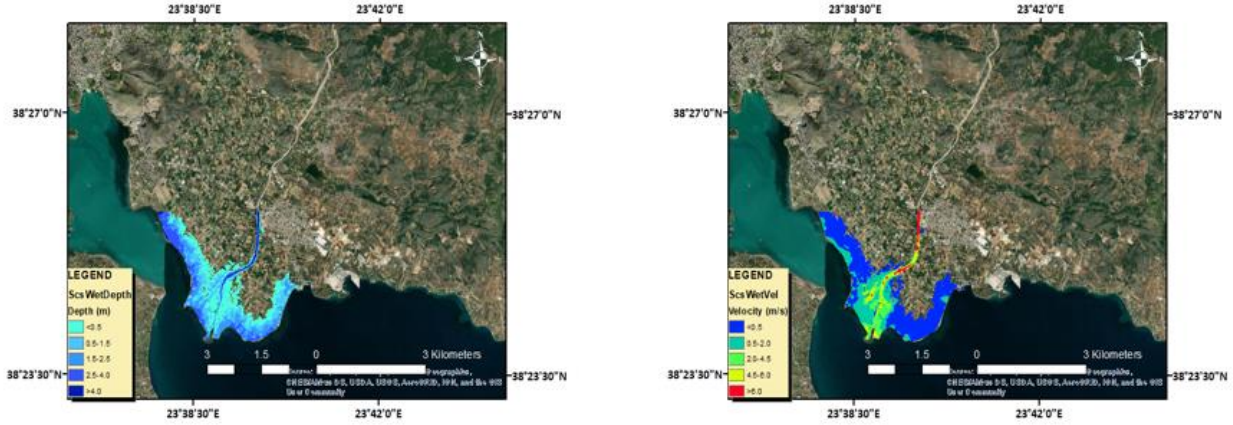


Figure 18: Maximum depth and velocity by the SCS method for wet humidity conditions

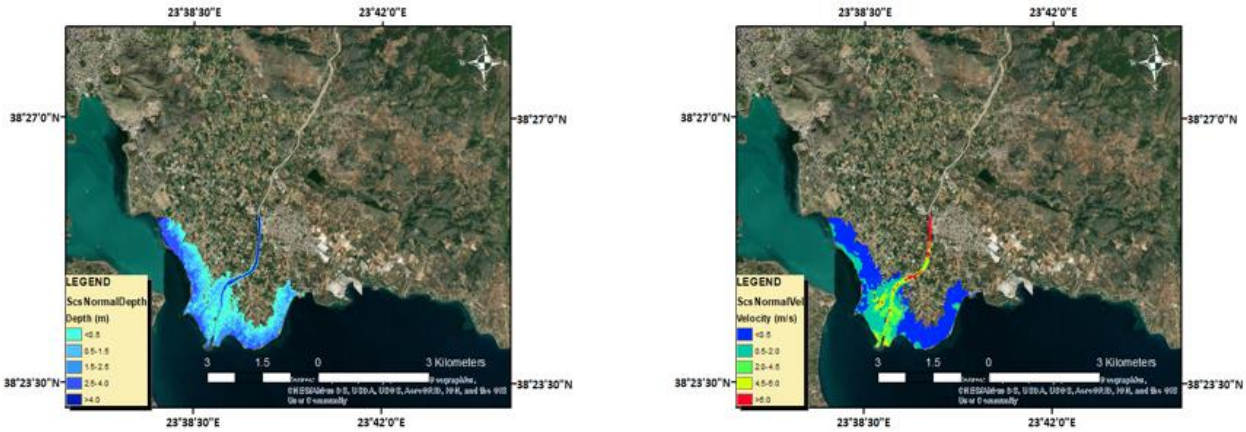


Figure 19: Maximum depth and velocity by the SCS method for normal humidity conditions

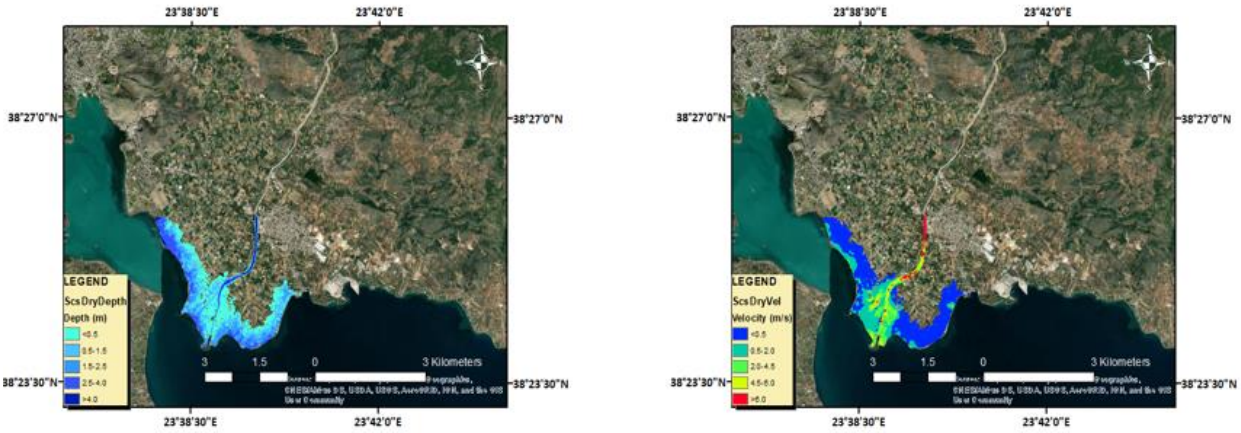


Figure 20: Maximum depth and velocity by the SCS method for dry humidity conditions

Sensitivity Analysis

In the last chapter of this thesis, the sensitivity analysis is applied on the curve number (CN), so that to find out how the results of the hydrological and hydraulic methods are affected in the study area. The range of the value of the CN, ranges from -6% to +6%. The values that were used on the sensitivity analysis are depicted in the Figure 20.

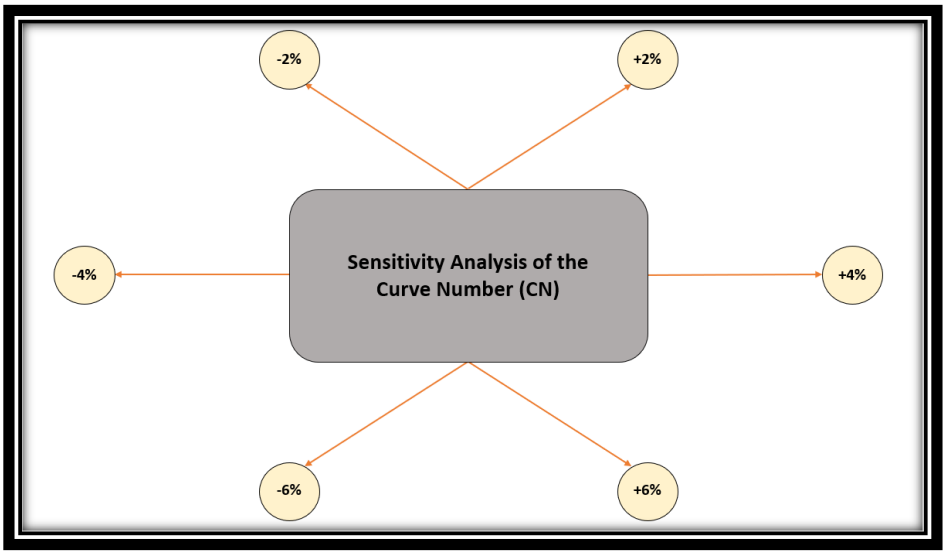


Figure 21: Sensitivity analysis of the Curve Number

In the following figures, the comparison of the maximum peak flow is shown. Each flow was produced by all the methods and for every humidity condition that has been discussed. It is obvious that, the peak flow has a constant rate of change, between the range of -6% till the +6%.

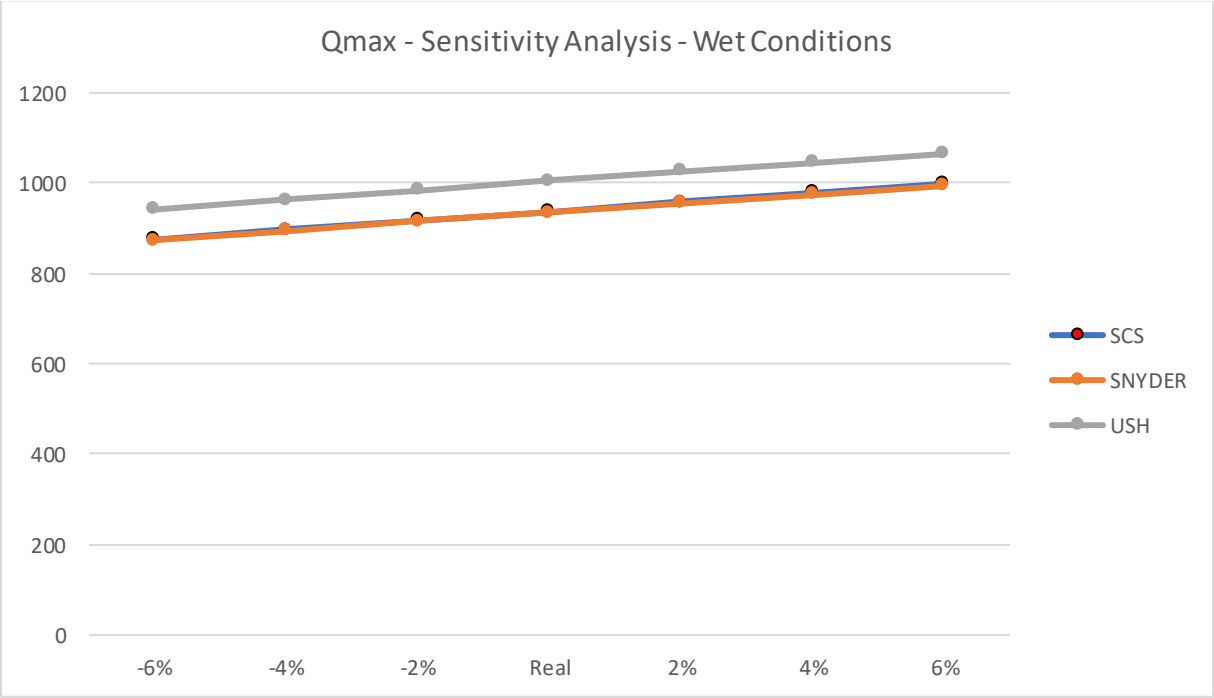


Figure 22: Peak flow for wet conditions

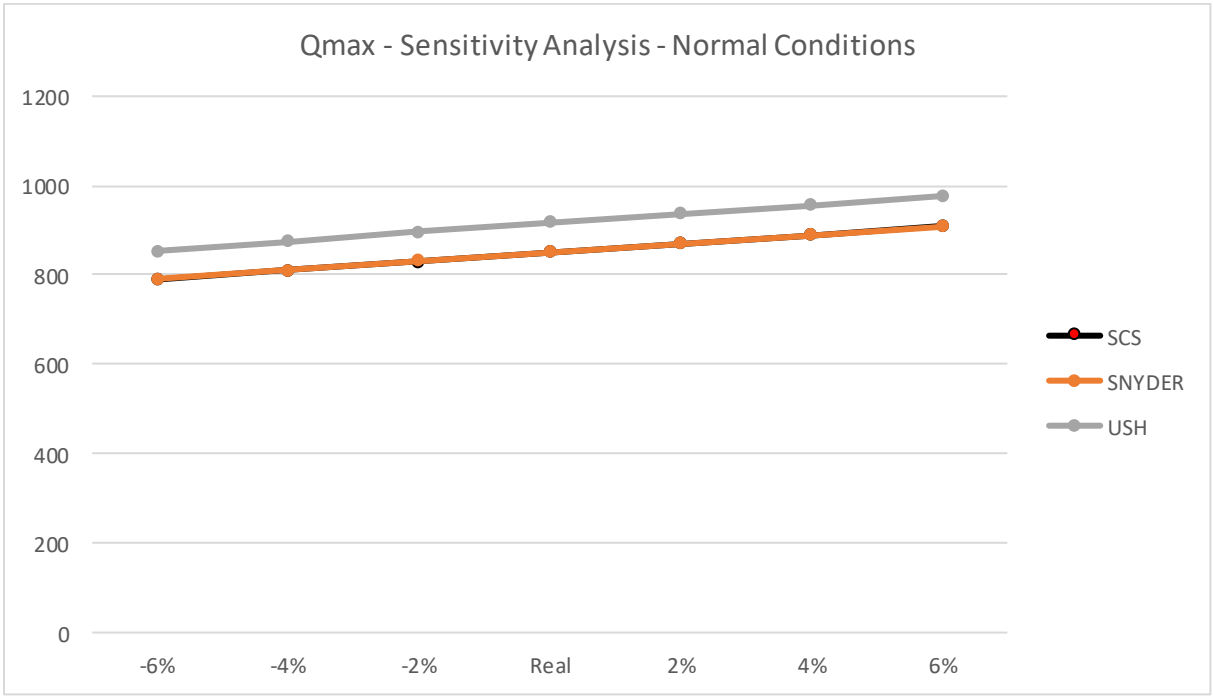


Figure 23: Peak flow for normal conditions

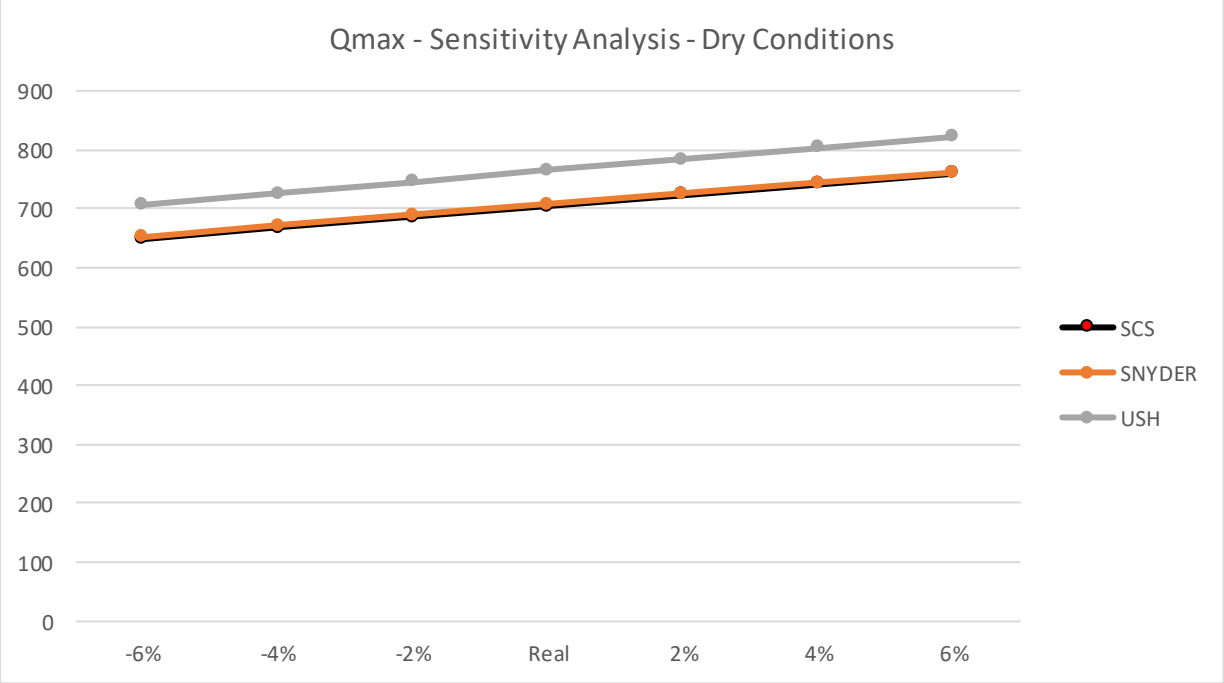


Figure 24: Peak flow for dry conditions

Conclusion

The scope of this diploma thesis was to analyze the effect of the flood in Vasiliko -Euboea, Central Greece, of the river Lilas, due to the rainfall that took place at the 8th of August in 2020. There were caused many negative effects in the study area and especially to the residential properties. The analysis includes hydrological and hydraulic aspects of flood and sensitivity analysis of the curve number. Finally, the main findings are summarized as follows:

- It is concluded that, the majority of the problems, due to floods and for the specific area, are mainly, due to heavy rainfall, which has a short duration.
- It is observed that many disasters, due to the flood in the area, mainly concern arable land, road connections and infrastructures, resulting in the poor functioning of the affected areas.
- The area, which presents the highest flood risk, is the part in the area, where the river flows. It seems to be very vulnerable, because the altitude is low, the impermeability is high etc. Regarding the land uses, it is observed that the main use is urban, while in some parts there are cultivated areas.
- Regarding the method of isochrones curves, it is concluded that it has a significant advantage, compared to the Snyder method and the SCS method. This is because the user is able to customize the data for much more accuracy.

- It is apparent, that the peak flow has a constant rate of change, which is resulted by the sensitivity analysis.
- Land uses have a significant impact on the results, as they are associated with the risk of flood. In addition, by the map of the Corine land use, several elements are taken into account, which are used in the hydraulic study, through the Manning coefficient, which is actually derived from land uses.
- Regarding the depths, the value is between 1.40 m and 1.60 m at the estuary point, while at some points along the river exceeds 5 m, for all methods and humidity conditions. In the other hand, the value of the flow velocity is between 1.80 m/s to 2.20 m/s near the estuary, while the flow velocity is over 6 m/s along the river.

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

- It is necessary to apply the sensitivity analysis, regarding the Manning factor, since it is a basic parameter for the hydraulic analysis.
- Flood protection project must take place, for the study area. The construction of various technical projects, such as embankments, artificial lakes for holding the water of the rainfall and possibly widening the width of the river at some points, at the down stream of the simulation point, where the flood hydrograph was produced.
- In the context of the hydraulic analysis, it is proposed to perform hydraulic simulations for historical episodes, in order to get the results compared. Possible satellite images, through these simulations, should be taken into consideration, for the optimal result.
- The competent authorities should investigate scenarios, related to flood prevention for the vulnerable areas. In this case, the construction of walkways and embankments are considered to be extremely necessary.
- The land uses, are one of the main factors in the analysis. In this case, an integrated approach is proposed, taking into account, as far as possible, land uses.

Selected References

Hanak T., Korytarova J., 2014, Risk zoning in the context of insurance: comparison of flood, snow load, windstorm and hailstorm, J Appl Eng Sci 12:137–144

Jorge A. Ramírez, 2011, Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics, Chapter 11

Kundzewicz, Z. W., Pińskwar, I., & Brakenridge, G. R., 2013, Large floods in Europe, 1985–2009. Hydrological Sciences Journal, 58(1), 1-7.

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

USACE, HEC-RAS River Analysis System, User's Hydraulic Reference Manual, Version 5.0, 2016

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

1.1.1 Η πλημμύρα ως φυσική καταστροφή

Σύμφωνα με το άρθρο 2 του νόμου 3199/2003, ως πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη εδάφους από νερό, το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται. Επιπρόσθετα, πλημμύρα μπορεί να προκληθεί σε ποτάμια, όταν η ροή υπερβεί την παροχετευτικότητα του καναλιού του ποταμού, κυρίως σε στροφές ή μαιάνδρους (Τσουτσούρου, 2012). Ενδεικτικά, στην Ελλάδα για την περίοδο 1980-2018, 156 άνθρωποι έχουν χάσει τη ζωή τους σε 56 πλημμυρικά επεισόδια (European Flood Fatalities, 2019). Τα τελευταία χρόνια, έχει παρατηρηθεί μία μεταβολή στο κλίμα, το οποίο πλέον για την Ελλάδα χαρακτηρίζεται από εντονότερα φαινόμενα βροχόπτωσης, άρα αναμένονται πιο συχνά πλημμυρικά επεισόδια. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η πλημμύρα στο νησί της Εύβοιας και συγκεκριμένα στον ποταμό Λήλα, η οποία αποτελεί αφορμή για την παρούσα διπλωματική εργασία.

Αξίζει να σημειωθεί πως, από τα αρχαία χρόνια παρατηρούνται αναφορές σχετικά με πλημμυρικά φαινόμενα, κυρίως με τη μορφή μύθων, καθώς αρκετοί πολιτισμοί τιμωρούνται και εκείνοι το αποδίδουν σε θεϊκή ενέργεια.

Κάθε πλημμυρικό φαινόμενο εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Τέτοιοι είναι οι βροχοπτώσεις, το λιώσιμο του χιονιού και ιδιαίτερα ανθρωπογενείς παράγονες, όπως η αστικοποίηση και η αποδάσωση. Ιδιαίτερα για την Ελλάδα, παρατηρείται συχνά το φαινόμενο πλημμύρας, σε περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης, με μικρή διάρκεια.

1.1.2 Κίνδυνος και επικινδυνότητα πλημμυρών

Σε πρώτο στάδιο, κρίνεται αναγκαία η διατύπωση της διαφοράς μεταξύ του κινδύνου πλημμύρας και της επικινδυνότητας αυτής. Η πλημμυρική επικινδυνότητα σχετίζεται αποκλειστικά με τα βάθη ροής της πλημμύρας, δηλαδή τον όγκο των υδάτων. Αντίστοιχα, ο πλημμυρικός κίνδυνος αφορά τις συνέπειες στον πληθυσμό, την οικονομία, το περιβάλλον και άλλους τέτοιους παράγοντες που σχετίζονται με τον άνθρωπο. Πρακτικά, ο όρος “risk” αναφέρεται στις απώλειες σχετικά με τη θνησιμότητα και τις ζημιές της οικονομίας, ενώ ο όρος “hazard” στα μελλοντικά σενάρια απο ζημιές που υπόκεινται τα κτίρια και των ανθρωπίνων κατασκευών γενικότερα.

Σύμφωνα με το ΦΕΚ ΚΥΑ, ως επικινδυνότητα πλημμύρας, ορίζεται η δυνατότητα εμφάνισης πλημμύρας σε συγκεκριμένο χώρο, που αντιστοιχεί σε δεδομένη πιθανότητα υπέρβασης.

Σύμφωνα με το ΦΕΚ ΚΥΑ, ως κίνδυνος πλημμύρας ορίζεται ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών, για την ανθρώπινη υγεία, το

περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με αυτή την πλημμύρα.

1.1.3 Νομοθεσία

Η νομοθεσία που διέπει τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, βασίζεται στην Οδηγία 2007/60/ΕΚ, της οποίας αναλύεται στη συνέχεια το θεσμικό της πλαίσιο.

Όπως έχει προαναφερθεί, ως πλημμύρα, σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/ΕΚ, ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους, το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, είναι στεγνό και δεν καλύπτεται από νερό. Οι πλημμυρικοί όγκοι προέρχονται από τη βροχόπτωση, την υπερχείλιση ποταμών, ορεινούς χειμάρρους, ρέματα της Μεσογείου και την είσροή της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές.

Το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ), αποτελεί βασικό εργαλείο προγραμματισμού δράσεων για την αντιμετώπιση των κινδύνων πλημμύρας, καθώς και κεντρικό μηχανισμό αναφοράς της χώρας προς την ΕΕ. Τα Σχέδια καταρτίζονται σε επίπεδο Υδατικού Διαμερίσματος (Περιοχή Λεκανών Απορροής Ποταμών), για τις περιοχές που υπάρχουν δυνητικά σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα, σύμφωνα με τα οριζόμενα στο άρθρο 7 της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ. Επίσης, τίθενται οι στόχοι για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, εστιάζοντας στη μείωση των δυνητικά αρνητικών συνεπειών, που οι πλημμύρες έχουν για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα. Τέλος, λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιοχών που καλύπτουν και παρέχουν ενδεδειγμένες λύσεις, ανάλογα με τις ανάγκες και τις προτεραιότητες των περιοχών αυτών, εξασφαλίζοντας παράλληλα συναφή συντονισμό εντός των περιοχών λεκάνης απορροής ποταμών και προωθώντας την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που έχουν θεσπισθεί, βάσει Οδηγίας 2000/60/ΕΚ, για τα υπόγεια και επιφανειακά υδατικά στυστήματα.

Τέλος, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έθεσε σε ισχύ την Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, αναγνωρίζοντας, μεταξύ άλλων, ότι:

- Οι πλημμύρες μπορεί να προκαλέσουν θανάτους, μετακινήσεις πληθυσμών και ζημιές στο περιβάλλον, να θέσουν σοβαρά σε κίνδυνο την οικονομική ανάπτυξη και να υπομνημονεύσουν τις οικονομικές δραστηριότητες της Κοινότητας.
- Οι πλημμύρες είναι φυσικά φαινόμενα, τα οποία είναι αδύνατο να προληφθούν. Παρ' όλα αυτά, ορισμένες ανθρώπινες δραστηριότητες, καθώς και η αλλαγή του κλίματος συμβάλλουν στην αύξηση της πιθανής έλευσης πλημμυρικού φαινομένου και κατά συνέπεια των αρνητικών επιπτώσεων.
- Στόχος καθίσταται η μείωση του κινδύνου των αρνητικών συνεπειών που συνδέονται με τις πλημμύρες, κυρίως στην ανθρώπινη υγεία, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά, στην οικονομική δραστηριότητα και στις υποδομές. Αναγκαίο αποτελεί, τα

μέτρα για την μείωση αυτών των κινδύνων, να συντονίζονται σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού, ώστε να είναι αποτελεσματικά.

Οι βασικές απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2007/60/ΕΚ χωρίζονται στα εξής στάδια, τα οποία επικαιροποιούνται ανά εξαετία:

- Προκαταρκτική εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στις λεκάνες απορροής των ποταμών και τις αντίστοιχες παράκτιες ζώνες και προσδιορισμός των περιοχών, όπου υπάρχουν δυνητικά σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας, ή είναι πιθανό να σημειωθεί πλημμύρα (Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας), σύμφωνα με τα άρθρα 4 και 5 της Οδηγίας.
- Κατάρτιση Χαρτών Επικυνδυνότητας Πλημμύρας και Χαρτών Κινδύνων Πλημμύρας για τις Ζώνες Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας, σύμφωνα με το άρθρο 6 της Οδηγίας.
- Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης Κινδύνου Πλημμύρας, σύμφωνα με το άρθρο 7 της Οδηγίας. Τα Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας καλύπτουν όλες τις πτυχές της διαχείρισης των Κινδύνων Πλημμύρας, εστιαζόμενα στην πρόληψη, την προστασία και την ετοιμότητα συμπεριλαμβανομένων των προβλέψεων πλημμυρών και συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης. Λαμβάνονται υπόψη για τα παραπάνω, τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ποταμού.

Σύμφωνα με την παράγραφο 3 της παρούσας Οδηγίας, οι Χάρτες Επικινδυνότητας Πλημμύρας, καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές, που θα μπορούσαν να πλημμυρήσουν, όσον αφορά στα ακόλουθα σενάρια:

- Πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων
- Πλημμύρες μέσης πιθανότητας (με πιθανή περίοδο επανάληψης ≥ 100 χρόνων)
- Πλημμύρες υψηλής πιθανότητας, ανάλογα με την περίπτωση

Για κάθε σενάριο, που εκτίθεται στην παράγραφο 3, παρατίθενται τα ακόλουθα στοιχεία:

- Έκταση της πλημμύρας
- Βάθος νερού ή στάθμη νερού, ανάλογα με την περίπτωση
- Ταχύτητα ροής ή σχετική ροή υδάτων, ανάλογα με την περίπτωση

Αντίστοιχα, οι Χάρτες Κινδύνου Πλημμύρας περιγράφουν τις δυνητικές αρνητικές συνέπειες, που συνδέονται με τις πλημμύρες, υπό τις συνθήκες των σεναρίων της παραγράφου 3 και εκφράζονται ως εξής:

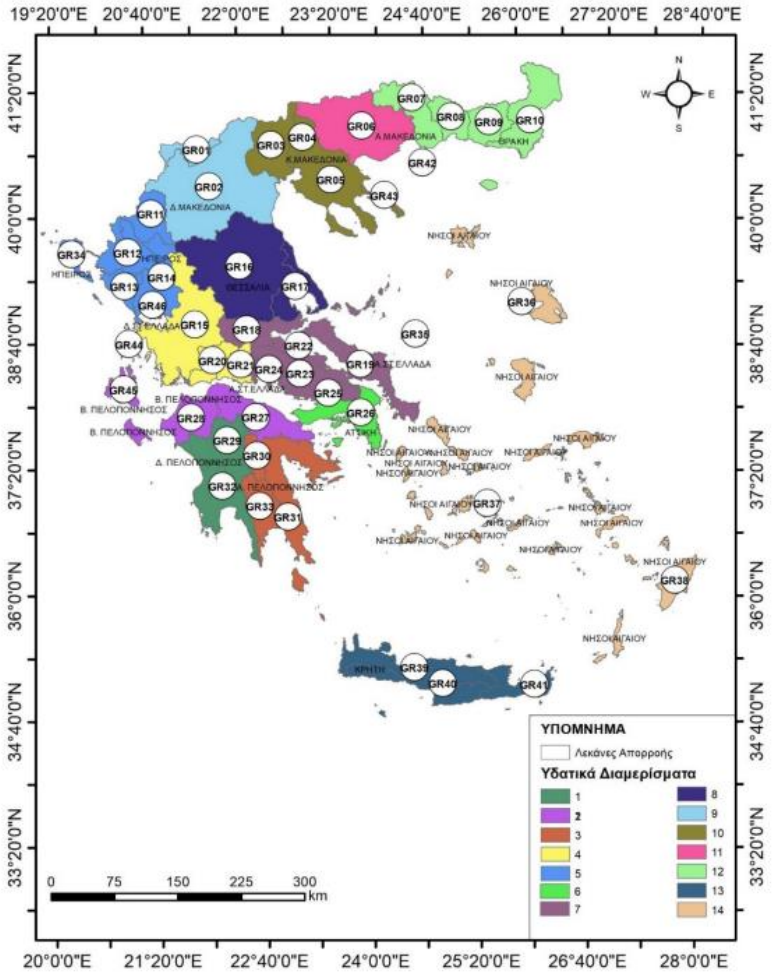
- Ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν.
- Τύπος οικονομικής δραστηριότητας στην περιοχή που ενδέχεται να πληγεί.
- Εγκαταστάσεις, κατά τα αναφερόμενα στο παράρτημα Ι της Οδηγίας 96/61/ΕΚ του Συμβουλίου, της 24ης Σεπτεμβρίου 1996, σχετικά με την ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχο της ρύπανσης, οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση, σε περίπτωση πλημμύρας και προστατευόμενες περιοχές, οι οποίες ορίζονται στο

παράρτημα IV, σημειό 1, σημεία i), iii), v) της οδηγίας 2000/60/ΕΚ και ενδέχεται να πληγούν.

- Άλλες πληροφορίες, τις οποίες το κράτος μέλος θεωρεί χρήσιμες, όπως η επισήμανση των περιοχών, όπου υπάρχει το ενδεχόμενο πλημμυρών, με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών, που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες, για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης.

Σύμφωνα με την Κ.Υ.Α Η.Π. 31822/1542/Ε103/2010, η γεωγραφική μονάδα εφαρμογής της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ είναι Περιοχές Λεκάνης Απορροής, που αντιστοιχούν στα Υδατικά Διαμερίσματα, του άρθροι 3 του Π.Δ. 51/2007, η ίδια γεωγραφική μονάδα εφαρμογής και της Οδηγίας 200/60/ΕΚ για τα Ύδατα.

Με την υπ. Αριθμ. 607/16.07.2010 (ΦΕΚ 1383 Β'/02.09.2012) απόφαση της Εθνικής Επιτροπής Υδάτων, όπως διορθώθηκε και ισχύει, έχουν καθοριστεί σε επίπεδο χώρας 46 Λεκάνες Απορροής Ποταμών, οι οποίες υπάγονται σε 14 Περιοχές Λεκανών Απορροής Ποταμών (Υδατικά Διαμερίσματα), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1.

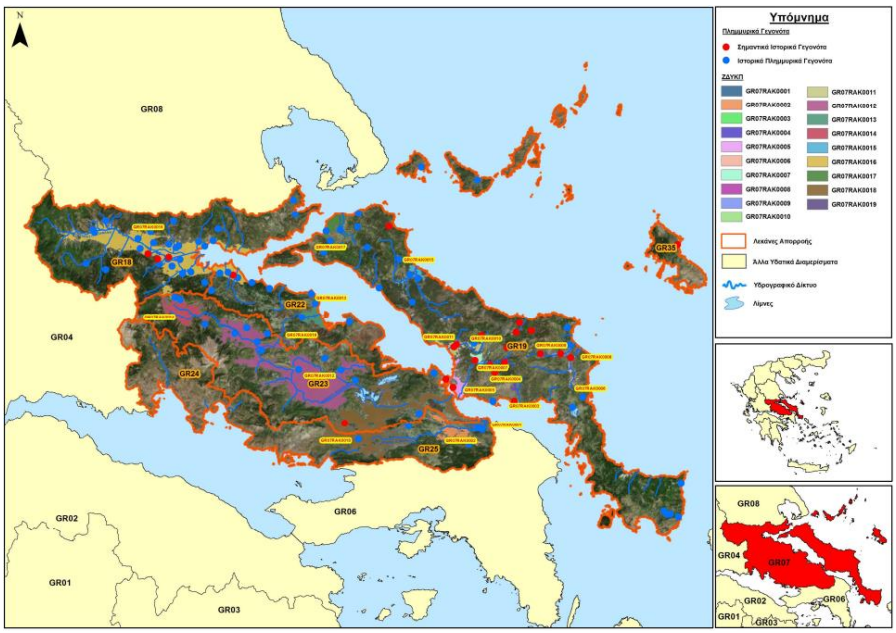


Σχήμα 1.0.1: Λεκάνες Απορροής και Υδατικά Διαμερίσματα της Ελλάδας (Πηγή: Ανδρικοπούλου, 2019)

1.2 Αντικείμενο Μελέτης

Μεταξύ 5 και 9 Αυγούστου του 2020, ένας μεσογειακός κυκλώνας, που ονομάστηκε από την ΕΜΥ ως «Θάλεια» (όπως συνηθίζεται σε τέτοιες περιπτώσεις), έπληξε τον Λαγκαδά Θεσσαλονίκης, την Κέρκυρα και κυρίως την Εύβοια. Αφήνει πίσω της 8 νεκρούς, ζημιές σε πάνω από 2.000 σπίτια και εκτεταμένες καταστροφές στο τομέα της γεωργίας. Ο λόγος, που η μελέτη αυτή λαμβάνει χώρα, είναι οι σημαντικές ζημιές που έχουν παρατηρηθεί σε οικισμούς του νησιού, λόγω πλημμυρικών φαινομένων και η προσπάθεια αντιμετώπισης αντίστοιχων προβλημάτων στο μέλλον. Σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι το εκτιμώμενο κόστος αποκατάστασης, σύμφωνα με αρμοδίους φορείς του νησιού, ανέρχεται 240 εκ. ευρώ για την περιφέρεια και τους δήμους, ενώ παράλληλα ανακοινώνεται εφάπαξ επίδομα 5.000 ευρώ για τους πληγέντες. (Εφημερίδα των συντακτών, 2020)

Αντικείμενο της παρούσας μελέτης αποτελεί η σύγκριση μεθόδων μετασχηματισμού βροχής σε απορροή για την αντιπλημμυρική μελέτη στον Λήλαντα ποταμό, που εκβάλει τα νερά του στον Ευβοϊκό κόλπο, μεταξύ Βασιλικού και Αγίου Νικολάου. Τα ακραία καιρικά φαινόμενα που έλαβαν χώρα μεταξύ 5 και 9 Αυγούστου του 2020, ανέδειξαν πολλά προβλήματα, τα οποία χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης. Για την προσέγγιση του προβλήματος αρχικά, απαιτείται ο χάρτης των ζωνών δυνητικά υψηλού πλημμυρικού κινδύνου της περιοχής (ΥΠΕΚΑ-ΕΓΥ, 2012), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2, καθώς και το ιστορικό των πλημμυρών. Σε γενικές γραμμές, παρουσιάζονται έντονα πλημμυρικά φαινόμενα στο νησί, ιδιαίτερα μάλιστα και σε κατοικημένες περιοχές. Χαρακτηριστικά, φαίνεται ότι ιστορικά έχουν εκδηλωθεί αρκετές πλημμύρες στην Εύβοια, αρκετές εκ των οποίων αποτελούν εξαιρετικά σημαντικές, μέχρι το 2012, βάσει του Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ, 2018).



Σχήμα 1.2: Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07) (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2018)

1.3 Διάρθρωση Εργασίας

Η διάρθρωση της παρούσας διπλωματική εργασίας έχει ως εξής:

- Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μία αναφορά στους ορισμούς και τις έννοιες, σχετικά με την πλημμύρα ως φυσικό φαινόμενο και κυρίως στην Ελλάδα. Ορίζεται η έννοια του κινδύνου και της επικυνδυνότητας μιας πλημμύρας, ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά στο θεσμικό και το νομοθεσιακό πλαίσιο που σχετίζονται με αυτή. Τέλος, παρουσιάζεται η διάρθρωση της εργασίας.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφεται η υπό μελέτη περιοχή. Εξετάζονται και αναλύονται διάφορα χαρακτηριστικά της, όπως είναι η γεωλογία, η γεωμορφολογία, το κλίμα, τα υδάτινα χαρακτηριστικά κ.α. Έπειτα, αναλύονται άλλα χαρακτηριστικά, που σχετίζονται με τον άνθρωπο, όπως είναι ο πληθυσμός, η οικονομία, οι διοικητικές δομές και οι χρήσεις γης. Εν τέλει, γίνεται αναφορά σε πλημμύρες που έχουν προηγηθεί στο παρελθόν στην ευρύτερη περιοχή.
- Στο τρίτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται μία ολοκληρωμένη προσέγγιση, βάσει μεθοδολογίας, που εφαρμόζεται στα λογισμικά και εργαλεία, που χρησιμοποιούνται. Αρχικά, περιγράφεται το λογισμικό ArcMap, στο οποίο αναλύεται η γεωμορφολογική ανάλυση, με τελικό στόχο την παραγωγή υδρογραφικού δικτύου και λεκάνης απορροής, σε συνδυασμό με τις χρήσεις γης και άλλες βασικές παραμέτρους. Ακόμη, χρησιμοποιείται η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών για την εξαγωγή του ΜΥΓ προκειμένου να εφαρμοστεί η USH μέθοδος και επιπλέον εφαρμόζονται οι μέθοδοι συνθετικού ΜΥΓ κατά Snyder και αδιάστατου ΜΥΓ κατά SCS, μέσω των οποίων περιγράφεται η σχέση βροχής-απορροής. Ύστερα, αναλύεται διεξοδικά το λογισμικό HEC-HMS, στο οποίο λαμβάνει χώρα η υδρολογική μελέτη. Εν προκειμένω, στόχος της συγκεκριμένης διαδικασίας, αποτελεί η παραγωγή του πλημμυρογραφήματος, το οποίο καθίσταται το δεδομένο εισόδου της επόμενης διεργασίας. Σχετικά με το HEC-HMS επισημαίνεται ότι γίνεται χρήση διάφορων μεθόδων, ώστε να προκύψει τελικά το πλημμυρογράφημα, ενώ η προσομοίωση εξετάζεται και για διάφορες συνθήκες υγρασίας. Τέλος, υλοποιείται η υδραυλική προσομοίωση και συγκεκριμένα στο λογισμικό HEC-RAS. Αναλυτικότερα, βάσει του πλημμυρογραφήματος που προκύπτει από το HEC-HMS, πραγματοποιείται δισδιάστατη ανάλυση, με τελικό στόχο την εξαγωγή των βαθών ροής και των μεγίστων ταχυτήτων στη περιοχή που προκλήθηκε η πλημμύρα.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την υδρολογική ανάλυση, για όλες τις μεθόδους, ενώ στη συνέχεια αυτά της υδραυλικής. Σχετικά με την πρώτη, παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα, για κάθε μέθοδο και για όλες τις συνθήκες υγρασίας, ενώ στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι πλημμυρικοί χάρτες, στους οποίους αποτυπώνονται τα απαιτούμενα βάθη ροής και οι μέγιστες ταχύτητες.

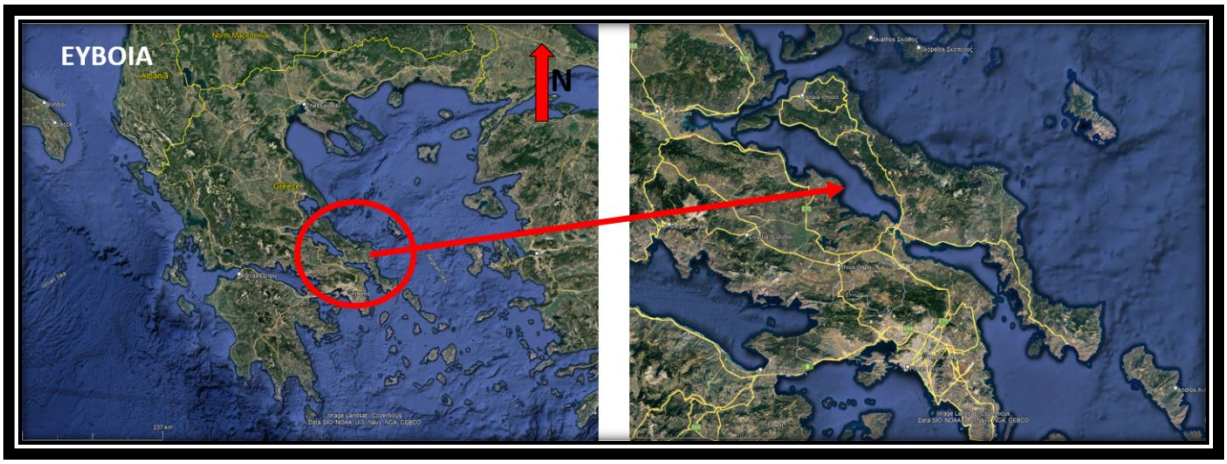
- Στο πέμπτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας της παραμέτρου αριθμού καμπύλης CN. Σε πρώτο στάδιο, γίνεται αναφορά στις πραγματικές συνθήκες, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα, για κάθε μέθοδο και συνθήκη υγρασίας χωριστά. Έπειτα, παρατίθεται διαγραμματικά η μεταβολή της παροχής αιχμής, ώστε να εξεταστεί ο τρόπος που αυτή μεταβάλεται. Η ανάλυση ευαισθησίας ολοκληρώνεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για κάθε συνθήκη υγρασίας.
- Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται αρχικά μία σύνοψη της μεθοδολογίας που εφαρμόζεται στην περιοχή και στη συνέχεια παρατίθενται τα γενικά και ειδικά συμπεράσματα της μελέτης. Τέλος, παρουσιάζονται θέματα που χρήζουν αντιμετώπισης.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Φυσικά Χαρακτηριστικά

2.1.1 Γεωγραφικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά

Η ονομασία Εύβοια, χρησιμοποιείται πρώτη φορά από τον Όμηρο και φανερώνει το γόνιμο καλλιεργήσιμο έδαφος και την ανεπτυγμένη βοοτροφία. Ιστορικά, συναντάται με διάφορες ονομασίες, όπως Μάρκα, Αβαντίς, Ελλοπία, Διακρία, Χαλκωδοντίς, Όχη, Ασωπίς, Δολίχη, Μελανηίς, Αονία, Εύριπος, Νεγρεπόντε και Εργιπόζ.

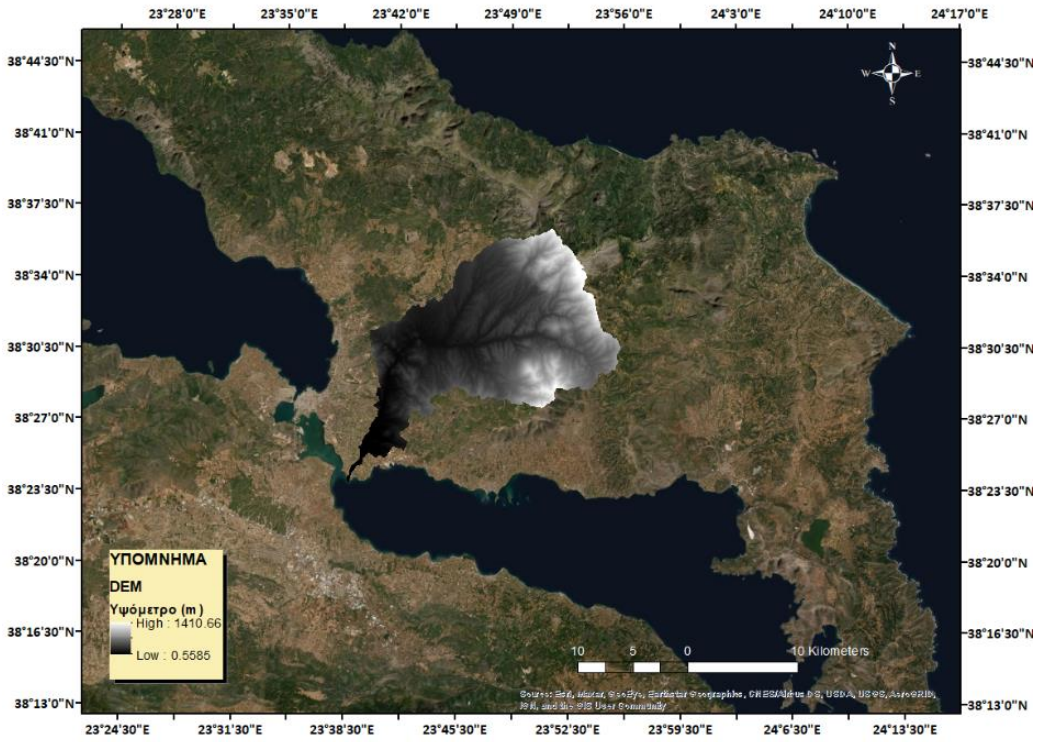


Σχήμα 2.1: Χάρτης Εύβοιας (δεξιά), θέση του νησιού στον ελλαδικό χώρο (αριστερά) (Πηγή: Ίδια επεξεργασία)

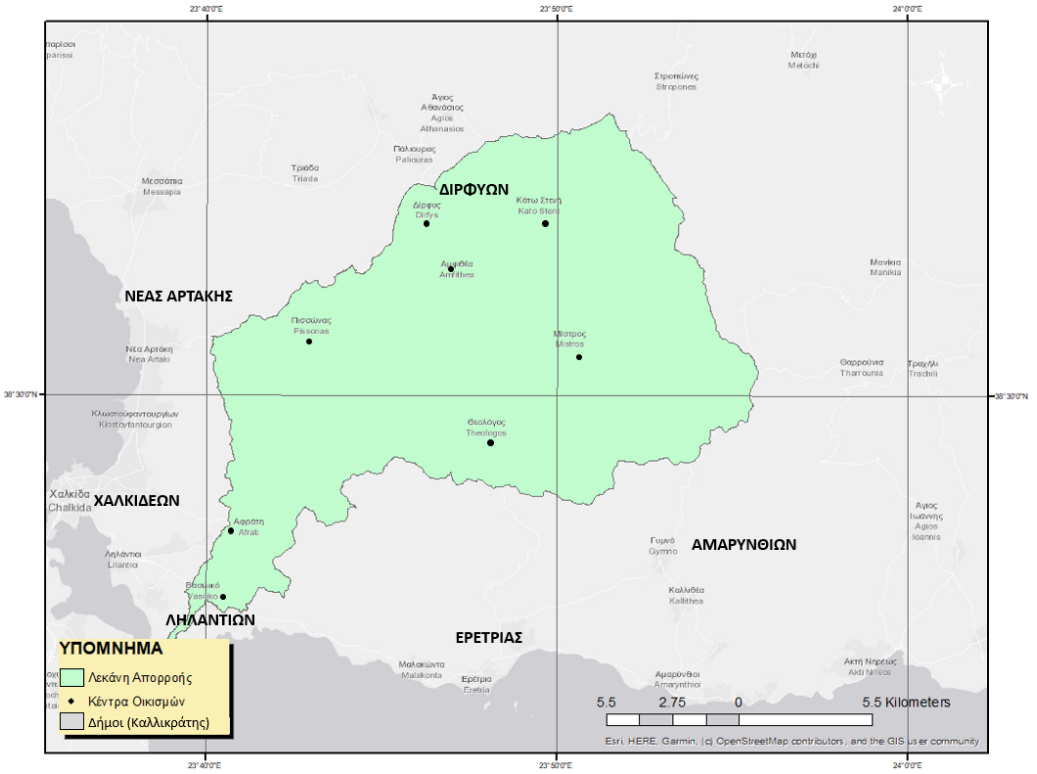
Η Εύβοια βρίσκεται στη Κεντρική Ελλάδα και είναι το δεύτερο μεγαλύτερο νησί της χώρας και το έκτο της Μεσογείου. Ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (ΥΔ07). Επίσης, αποτελεί ορεινό νησί, καθώς έχει αρκετά βουνά, με μεγαλύτερο τη Δίρφη, που φτάνει σε υψόμετρο 1743 m.

Η Εύβοια έχει συνολική έκταση 3687 km² και τα γεωγραφικά της μήκη και πλάτη είναι 23ο 48' 56.14" Ε και 38ο 33' 42.68" Ν αντίστοιχα. Μαζί με τη Λευκάδα, απότελούν τα μόνα νησιά, των οποίων η πρόσβαση είναι οδική, μέσω γεφυρών. Συγκεκριμένα, η σύνδεση Εύβοιας πραγματοποιείται, μέσω της χαρακτηριστικής γέφυρας των 700 περίπου μέτρων. Πριν γίνει η κατασκευή της όμως, η μετακίνηση γινόταν μέσω της γνωστής παλιάς γέφυρας στην παραλία της Χαλκίδας, όπου λαμβάνει χώρα και το φαινόμενο των «τρελών νερών». Ο πληθυσμός του νησιού, κατά την απογραφή του 2011 ανέρχεται στους 210957 κατοίκους και διοικητικά χωρίζεται σε οκτώ δήμους (Χαλκιδέων, Διρφύων-Μεσσαπίων, Ερέτριας, Καρύστου, Ιστιαίας-Αιδηψού, Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας και Κύμης-Αλιβερίου, Σκύρου), σύμφωνα με το σχέδιο Καλλικράτης. Οι κάτοικοι του νησιού απασχολούνται σε διάφορους τομείς, με κυριότερους τον τουρισμό, τη γεωργία, την κτηνοτροφία και το ψάρεμα. Η Εύβοια διαθέτει 13 λιμάνια, τα 6 εκ των οποίων εξυπηρετούν την ακτοπλοϊκή σύνδεση του νησιού. Τέλος, δεν υπάρχει αεροδρόμιο στο νησί και ο λόγος είναι η οδική πρόσβαση που προϋπάρχει.

Η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εκτείνεται εντός των ορίων της δημοτικής ενότητας Χαλκιδέων και συγκεκριμένα κοντά στην περιοχή Βασιλικό. Ο υπό μελέτη ποταμός ονομάζεται Λήλας και είναι ο μεγαλύτερος ποταμός της Εύβοιας. Πηγάζει από τα βουνά Δίρφη - Ξηροβούνι - Όλυμπο, περνά από τα υψίπεδα των Καθενών - Μίστρου - Θεολόγου, καταλήγει στο Ληλάντιο και στη συνέχεια χύνεται στον Ευβοϊκό κόλπο, κοντά στο φρούριο του Μπορτζίου. Ο συγκεκριμένος ποταμός έχει μεγάλες ποσότητες νερού τον χειμώνα και την άνοιξη. Αντίθετα, κάθε καλοκαίρι παύει να ρέει νερό σε αυτόν. Ο Λήλας αποτελεί τη βασική πηγή άρδευσης των καλλιεργήσιμων εκτάσεων στην ευρύτερη περιοχή. Αμπέλια, ελαιώνες και διάφοροι κήποι ποτίζονται από τα ύδατά του (www.steni.gr, 2020). Παρακάτω, παρατίθεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) της υπό μελέτη περιοχής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Συγκεκριμένα, παρατηρούνται τα υψόμετρα της λεκάνης απορροής σε όλη την έκτασή της. Ενδεικτικά, το ελάχιστο υψόμετρό της είναι 0.5 m, το μέγιστο 1411 m, ενώ το μέσο υψόμετρο 352 m. Στο Βόρειο-Βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής εμφανίζονται τα μεγαλύτερα υψόμετρα, όπου είναι το όρος Δίρφυς. Στο τμήμα του Ευβοϊκού κόλπου είναι το σημείο εκβολής και συγκεκριμένα κοντά στο Μπούρτζι. Σχετικά με την συνολική έκταση της λεκάνης, αγγίζει τα 252 km². Επιπλέον, η γεωγραφική θέση και τα όρια της περιοχής μελέτης, συγκριτικά με τους Δήμου κατά Καλλικράτη, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3, που ακολουθεί.



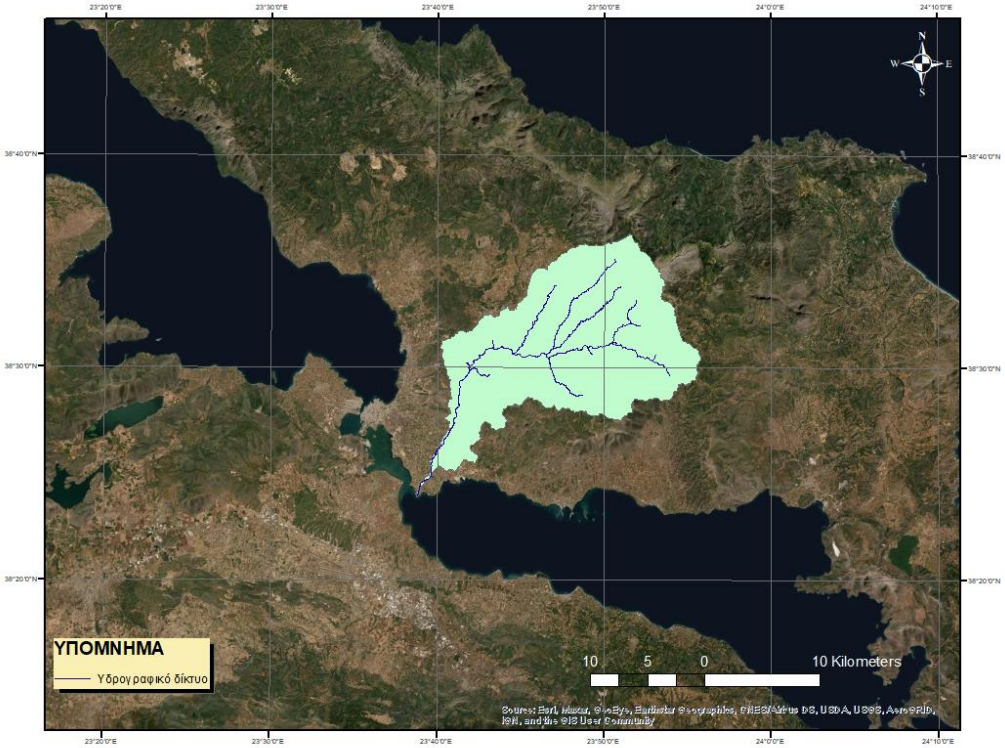
Σχήμα 0.1.2: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) της λεκάνης απορροής (με χρήση του προγράμματος ArcMap) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 2.3: Περιοχή μελέτης, Καλλικρατικοί Δήμοι και κέντρα οικισμών (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

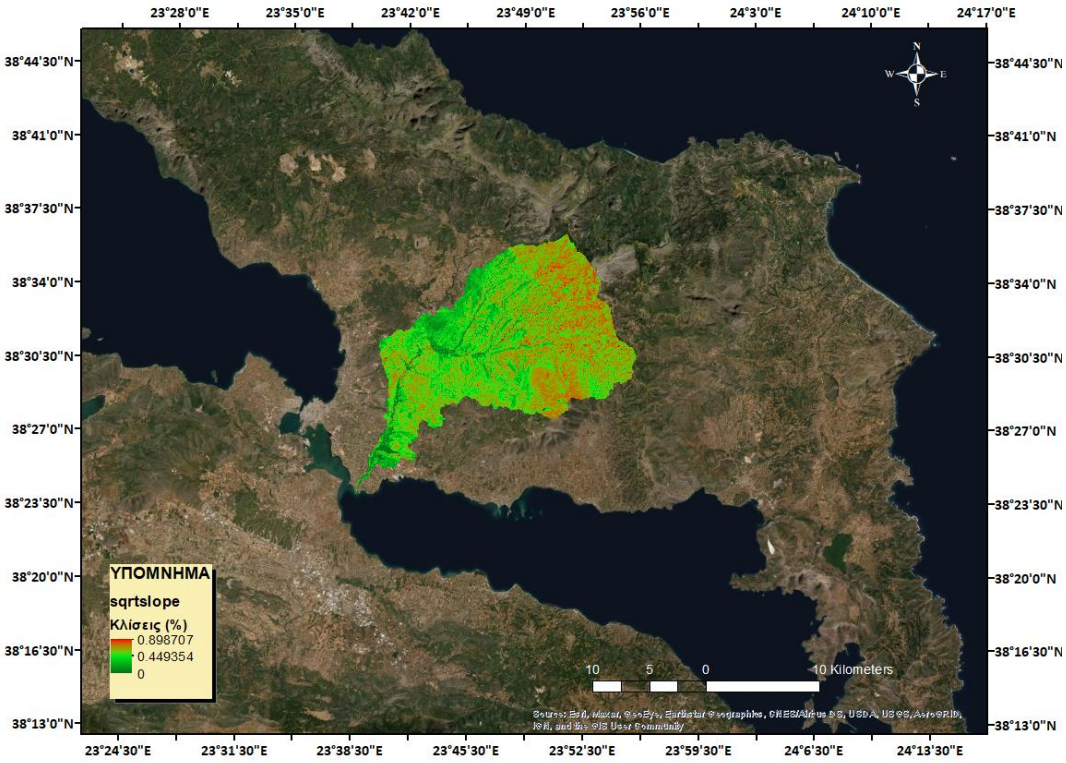
Αναφορικά με το υδρογραφικό δίκτυο της ζώνης, σημειώνεται ότι περιορίζεται στα ανατολικά και στα νότιο – ανατολικά. Οι υδάτινες ποσότητες συσσωρεύονται κυρίως από το βόρειο τμήμα της λεκάνης απορροής, όπου στη συνέχεια καταλήγουν στο στενό τμήμα του ποταμού, στο σημείο εκβολής. Η λεκάνη του χειμάρρου Λήλα, δεν αποτελείται από ομαλή δενδριτική μορφή, συνεπώς έχει τυχαία ανάπτυξη. Τέλος, το μήκος της κύριας μισγάγγειας είναι 34 km.

Επιπροσθέτως, υπογραμμίζεται ότι οι παραχείμμαροι του ποταμού είναι σημαντικά μικροί, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Παρ' όλα αυτά, καθίστανται ιδιαίτερα σημαντικοί, αφού τελικά τροφοδοτούν την κύρια κοίτη του, στους πρόποδες του όρους Δίρφυς, ενώ μάλιστα βρίσκονται όλοι εκτός ζώνης. Συγκεκριμένα, στο Καλαμαντάρι συμβάλλουν το Βαθύ ρέμα και Ανάσταση. Το Στενιώτικο από τη Στενή μαζί με το Καμπιώτικο ρέμα από την Καμπιά, συμβάλλουν στο Πουρνιώτικο στον Πουρνό, που αποτελεί συνέχεια του ρέματος Καλαμαντάρι. Στη συνέχεια, ύστερα από τον Πουρνό, συμβάλλουν από νότο το Βαθύ ρέμα και δυτικά το ρέμα Κοπρισία. Εν συνεχεία, μετά τη συγκέντρωση όλου του υδάτινου όγκου από τις παραπάνω περιοχές, το Πουρνιώτικο ρέμα εισέρχεται από την ανατολική πλευρά της ζώνης και γίνεται διακλαδισμός σε βόρεια και νότια κοίτη. Στην πρώτη, συβμάλει από το Βορρά η κύρια κοίτη του Λήδα, η οποία αποτελεί μαιανδρικής μορφής. Στη δεύτερη, νότια των Καθενών, συμβάλει εντός ζώνης στο Λήδα, το ρέμα Φακές. Τέλος, η επανένωση του Λήδα με το Πουρνιώτικο συμβαίνει εντός ζώνης σε μία κοίτη, η οποία αμέσως μετά στρέφεται από Α – Δ σε ΒΑ – ΝΔ (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2018).



Σχήμα 2.4: Υδρογραφικό Δίκτυο της λεκάνης απορροής (με χρήση του προγράμματος ArcMap) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Επισημαίνεται επιπλέον, πως το ανάγλυφο της ζώνης είναι πεδινό στο μεγαλύτερο σύνολο της επιφάνειας και χαρακτηρίζεται από μικρές μορφολογικές κλίσεις. Ωστόσο αυτές αυξάνονται στις παρυφές των λόφων της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα, η κοίτη του Λήλαντα ποταμού έχει μικρή σχετικά κλίση. Συγκεκριμένα, η μέση κλίση της λεκάνης απορροής αγγίζει τις 16°. Παρατίθενται αναλυτικά στο Σχήμα 2.5, οι κλίσεις των εδαφών της υπό μελέτης περιοχής (Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, 2018).



Σχήμα 2.5: Χάρτης Κλίσεων γης της λεκάνης απορροής (με χρήση του προγράμματος ArcMap) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Αναλυτικά τοπογραφικά στοιχεία για την λεκάνη απορροής, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1, που ακολουθεί:

Πίνακας 2.1: Τοπογραφικά στοιχεία της λεκάνης απορροής

Έκταση (km^2)	252
Μέγιστο υψόμετρο (m)	1411
Ελάχιστο υψόμετρο (m)	0.5
Μέσο υψόμετρο (m)	350
Μέση κλίση (^{o})	16
Μήκος κύριας μισγάγγειας (km)	34

2.1.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Το νησί της Εύβοιας, αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο νησί της Ελλάδος και έχει μεγάλη ποικιλία στη γεωμορφολογία της. Τα κυριότερα πετρώματα τα οποία αφορούν την υπό μελέτη λεκάνη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6, είναι τα παρακάτω και παρατίθενται οι ιδιότητες αυτών (Γεωλογία Μηχανικού, Τσιαμπάος, Μαρίνος, 2016):

Η υπό μελέτη λεκάνη, αποτελείται κυρίως από ιζηματογενή πετρώματα. Τα πετρώματα αυτά σχηματίσθηκαν στην επιφάνεια της γης από την καταστροφή προϋπαρχόντων πετρωμάτων. Τα υλικά αποσαθρώσεως ή αποσπάσεως από το υγιές πέτρωμα μεταφέρονται είτε με τη βαρύτητα, είτε με τον αέρα, είτε κυρίως, με τα ρέοντα νερά και συσσωρεύονται σε χαμηλότερα σημεία, είτε σε χερσαίες λεκάνες, είτε μέσα σε λίμνες, είτε σε θάλασσες. Εκεί, με την πάροδο του χρόνου και τη συνεχή επισώρευση, τα χαλαρά ή απλώς συνεκτικά υλικά, μετατρέπονται σε συμπαγή, δηλαδή σε πετρώματα (διαγένεση). Τα κλαστικά πετρώματα είναι, ανάλογα με το μέγεθος του συνθετικού τους κόκκου: τα κροκαλοπαγή, τα λατυποπαγή (σαν τα κροκαλοπαγή αλλά με γωνιώδη τεμάχη), οι ψαμμίτες, οι ιλυόλιθοι, οι αργιλικοί σχιστόλιθοι. Τα κλαστικά πετρώματα όταν δεν έχουν διαγενεθεί, μετά την απόθεση του υλικού τους, παραμένουν σαν εδάφη (κατ' αναλογία: κροκάλες, λατύπες, άμμοι, ιλείς, άργιλοι).

Γενικά, η αντοχή των πετρωμάτων αυτών είναι πιο μικρή από εκείνη των πυριγενών και μεταμορφωμένων (πλην σχιστολίθων). Τα μεγαλύτερης αντοχής είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα, οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή, όταν είναι πολύ συμπαγή. Οι αργιλικοί σχιστόλιθοι και οι μάργες (αργιλοασβεστιτικό πέτρωμα) είναι δυνατό να συμπεριφέρονται σαν εδάφη και όχι σαν πετρώματα, αν έχουν έντονη την παρουσία ευαίσθητου και πλαστικού αργιλικού υλικού. Δεν είναι ασυνήθιστες επίσης οι περιπτώσεις, όπου η καλή συμπεριφορά κάποιου ιζηματογενούς πετρώματος, μειούται από την παρουσία λεπτών ενδιαστρώσεων αργιλικού ιζήματος (μάργα, αργιλικός σχιστόλιθος), πάχους συχνά μερικών χιλιοστών, που προέρχεται από την αρχική ιζηματογένεση του όλου συστήματος.

Από πλευράς περατότητας και τα εδώ πετρώματα μπορούν να θεωρηθούν πολύ μικρής περατότητας, ή αδιαπέρατα στο σύνολο μιας εξαπλώσεώς τους. Περατα είναι δυνατό να είναι μόνο στο επιφανειακό χαλαρωμένο ή ρηγματωμένο τμήμα τους. Η περατότητα του τμήματος αυτού, αφορά μόνο θέματα κατασκευής τεχνικών έργων, όπως διαφυγές, κάτω από φράγματα και όχι συγκέντρωση υπόγειου νερού για εκμετάλλευση. Εξαίρεση από τον κανόνα αυτό, δηλαδή πετρώματα που μπορεί να έχουν μεγάλη περατότητα σε όλη τη μάζα τους είναι ασβεστόλιθοι (ή δολομίτες) και οι χαλαροί ψαμμίτες- κροκαλοπαγή.

Σημαντικός παράγοντας για την μελέτη της λεκάνης, αποτελεί η εύρεση του τύπου των εδαφών της. Ανάλογα με τον τύπο εδάφους και την υδρολογική κατάσταση, τα εδάφη κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες. Συγκεκριμένα, χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες και αυτές είναι (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018):

- Εδάφη τύπου Α:

Είναι τα εδάφη που παρουσιάζουν πολύ υψηλό ρυθμό διήθησης, δηλαδή έχουν πολύ χαμηλό δυναμικό επιφανειακής απορροής.

- Εδάφη τύπου B:

Είναι εδάφη, με μέσους ρυθμούς διήθησης.

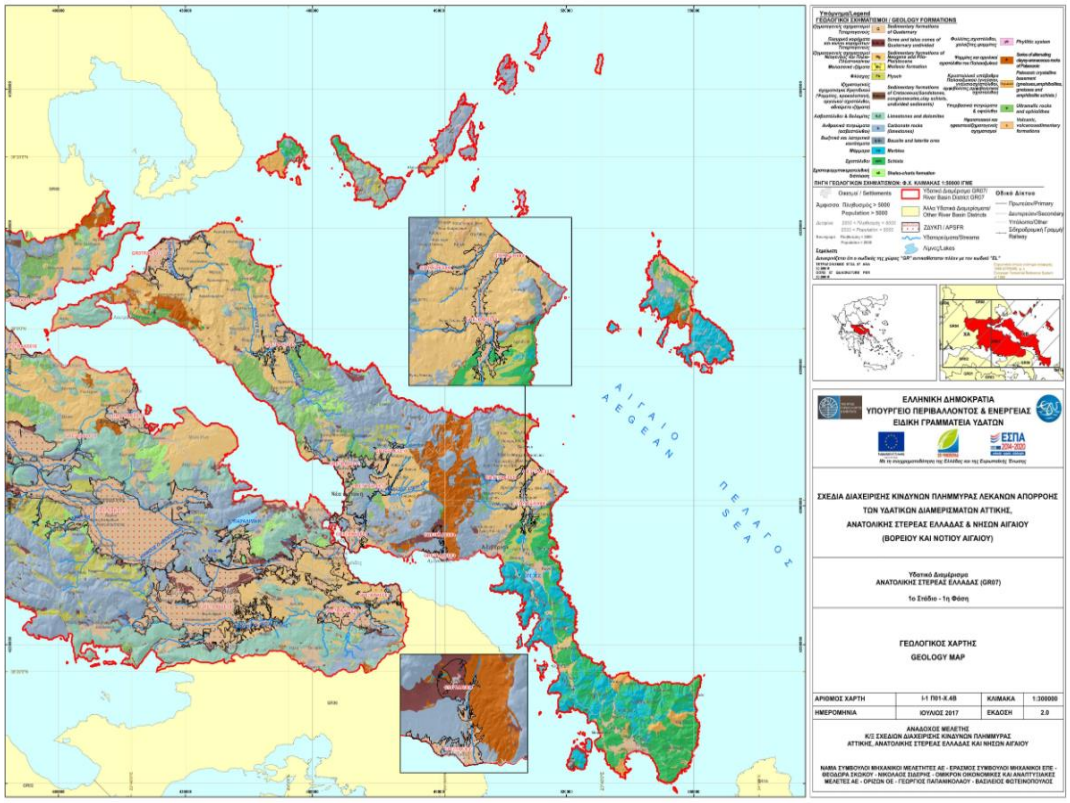
- Εδάφη τύπου C:

Είναι εδάφη μικρού ρυθμού διήθησης.

- Εδάφη τύπου D:

Εδάφη πολύ μικρού ρυθμού διήθησης.

Τα εδάφη της υπό μελέτης λεκάνης, ανήκουν κατά κύριο λόγο στα εδάφη τύπου C, δηλαδή εδάφη μικρού ρυθμού διήθησης.



Σχήμα 2.6: Γεωλογικός χάρτης υδατικού διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2017)

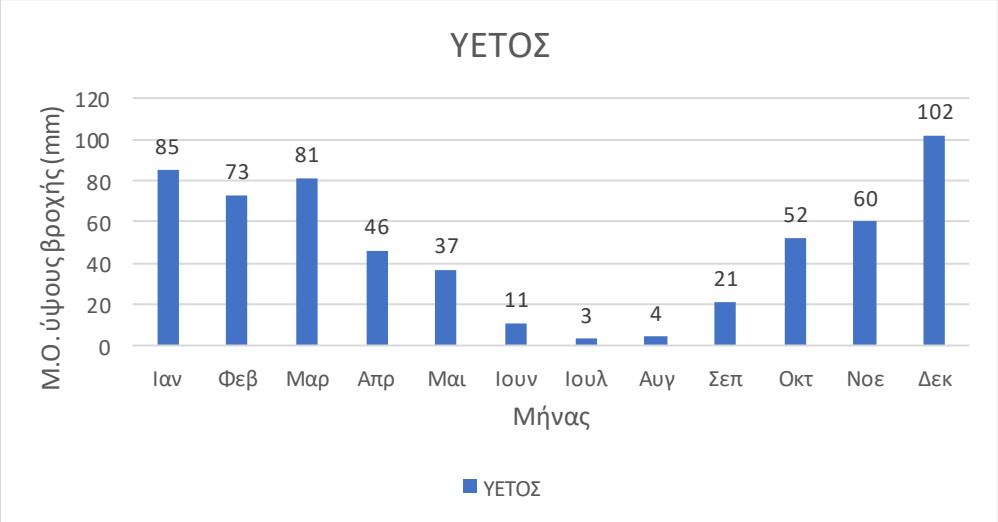
2.1.3 Κλιματικά στοιχεία

Η Εύβοια αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας και το έκτο μεγαλύτερο της Μεσογείου. Μέσω της σύγχρονης και της παλιάς γέφυρας, όπως αποκαλείται, γίνεται η σύνδεσή της με τη Στερεά Ελλάδα. Βασικό χαρακτηριστικό της συνίσταται το γεγονός ότι ποικίλει στο θέμα της βλάστησης. Συγκεκριμένα, στο βόρειο τμήμα της συναντάται πυκνή βλάστηση, με πυκνά πευκοδάση, που φτάνουν μέχρι και τη θάλασσα. Αντίθετα, στο νότιο τμήμα είναι σημαντικά ελλιπής (meteofarm, 2022).

Το κλίμα της ευρύτερης περιοχής καθίσταται εύκρατο μεσογειακό, το οποίο συντελεί στην ανάπτυξη όλων των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων, και στην άφθονη βλάστησή της. Οι χειμώνες είναι αρκετά ήπιοι, με συχνές βροχές και σπάνια κύματα ψύχους. Οι σημαντικά χαμηλές θερμοκρασίες οφείλονται σε τοπικούς παράγοντες. Επίσης, κατά τις περιόδους που προκαλείται βροχή, συνήθως συνοδεύεται από ανέμους που φυσούν δυτικά και νοτιοδυτικά. Ο καιρός είναι ψυχρός όταν επικρατούν βοριάδες που πρακτικά μεταφέρεται το ψυχρό κύμα και οι αέριες μάζες από τις πολικές περιοχές. Αντίθετα, όταν φυσούν νότιοι άνεμοι, έρχονται θερμότερες μάζες αέρα, που προέρχονται από τη Σαχάρα.

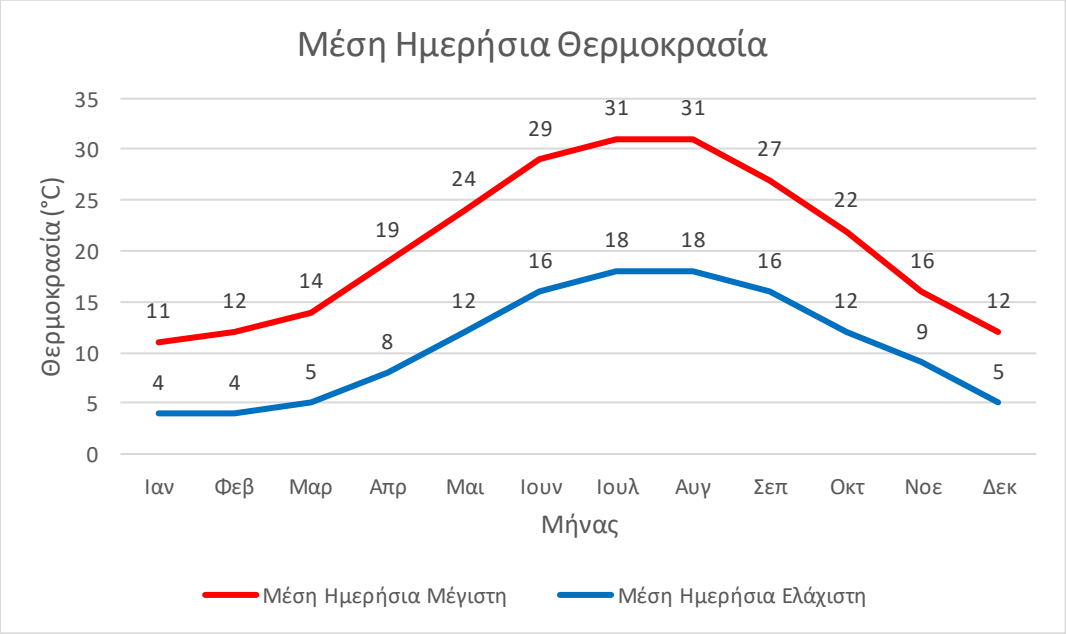
Αντίθετα, την καλοκαιρινή περίοδο, υπάρχει αρκετή ζέστη και το κλίμα είναι θερμό με σχεδόν καθόλου βροχές. Επισημαίνεται πως δεν καταγράφονται σημαντικά υψηλές θερμοκρασίες και αυτό συμβαίνει, λόγω του μετριασμού της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει, εξαιτίας της επίδρασης της θάλασσας και των βοριάδων που επικρατούν τα καλοκαίρια. Τέλος, η ατμόσφαιρα δεν είναι αποπνικτική, καθώς τις πιο πολλές μέρες η σχετική υγρασία είναι χαμηλή (Η Μεσόγειος μας, 2013).

Στη συνέχεια, παρατίθεται διαγραμματικά η κατανομή του υετού στη νήσο Εύβοια, κατά τη διάρκεια κάθε μήνα του έτους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Παρατηρείται πως μετά το καλοκαίρι, αυξάνουν οι βροχοπτώσεις ομαλά μέχρι τους χειμερινούς μήνες και έπειτα σταδιακά μειώνονται μέχρι τους καλοκαιρινούς.



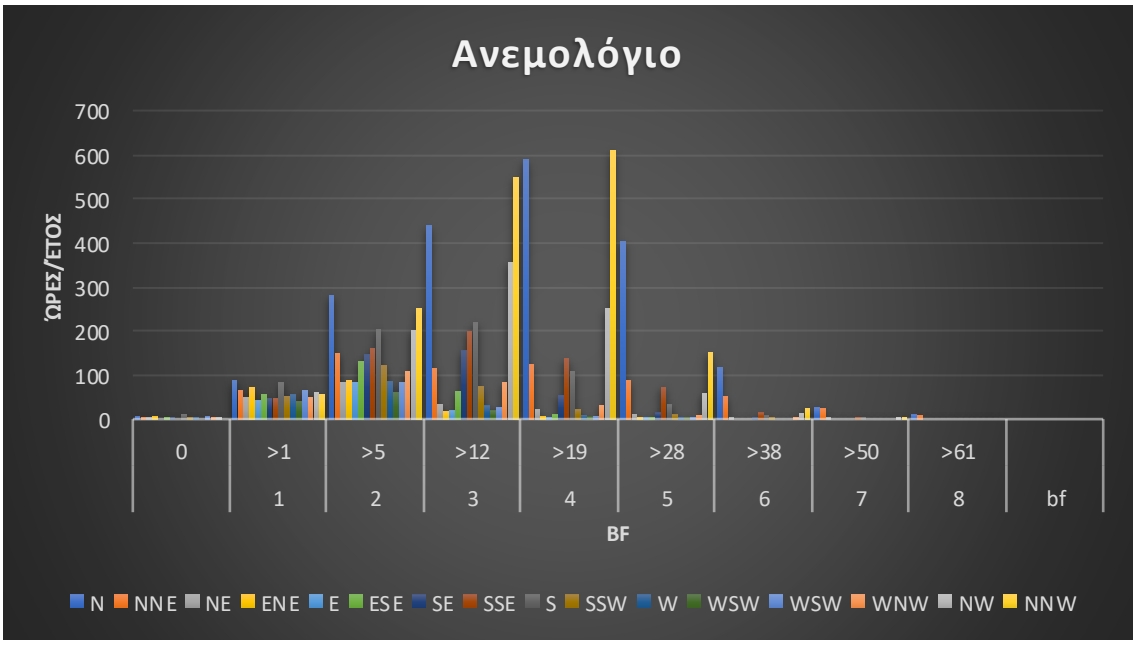
Σχήμα 2.7: Μηνιαίο υετογράφημα της Εύβοιας (Πηγή: δεδομένα από meteoblue.com, ίδια επεξεργασία)

Έπειτα, στο Σχήμα 2.8 αναλύονται οι μέσες ημερήσιες θερμοκρασίες για όλους τους μήνες του έτους. Είναι προφανές ότι υπάρχει αναλογική αύξηση και μείωση αντίστοιχα των μέσων ημερήσιων θερμοκρασιών και στην περίπτωση των ψυχρών, αλλά και για τις θερμές.



Σχήμα 2.8: Μέση ημερήσια θερμοκρασία (°C) Εύβοιας (Πηγή: δεδομένα από meteoblue.com, ίδια επεξεργασία)

Αναγκαία καθίσταται και η αναπαράσταση της επίδρασης των ανέμων. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.9, φαίνεται η διάρκεια του κάθε κατεύθυνσης ανέμου, μέσα στο χρόνο.

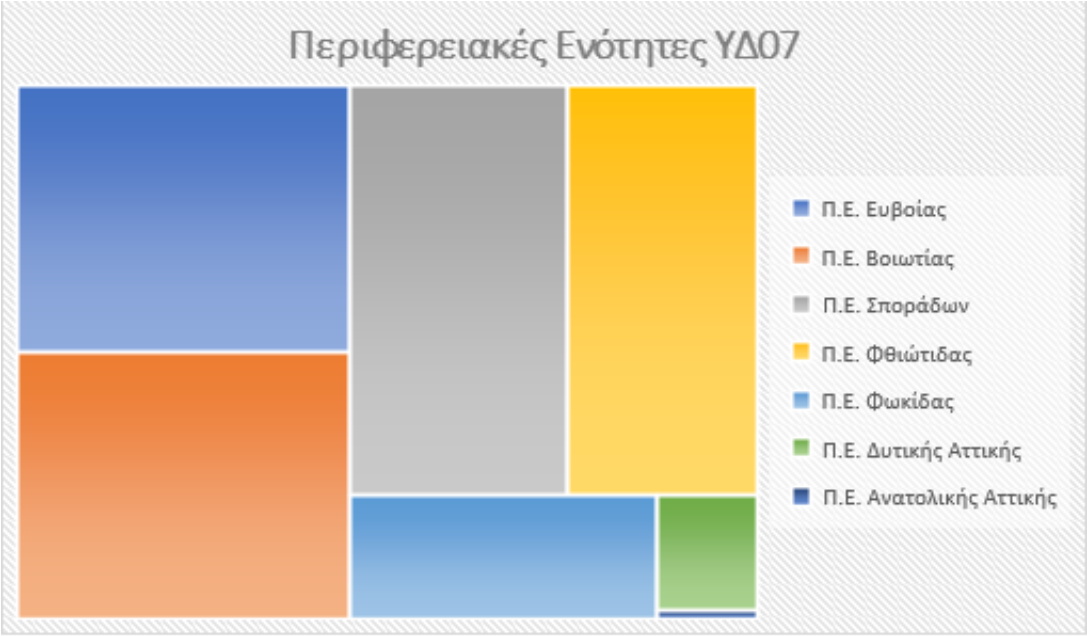


Σχήμα 2.9: Ανεμολόγιο της Εύβοιας (Πηγή: δεδομένα από meteoblue.com, ίδια επεξεργασία)

2.2 Ανθρωπογενή Χαρακτηριστικά

2.2.1 Διοικητική δομή

Η Εύβοια ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα της Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (ΥΔ07), το οποίο έχει συνολική έκταση 12291 km^2, ενώ το υπό μελέτη νησί έχει αντίστοιχα 4167 km^2. Οι περιφερειακές ενότητες, που ανήκουν στο συγκεκριμένο υδατικό διαμέρισμα, είναι η Εύβοια (συμπεριλαμβάνεται και η Σκύρος), η Βοιωτία, οι Σποράδες, αρκετά τμήματα της Φθιώτιδας (το 87.2% της περιφερειακής της ενότητας) και της Φωκίδας (το 42.2% περιφερειακής της ενότητας) και λίγα τμήματα της Δυτικής Αττικής (8.2% της περιφερειακής ενότητας), της Ανατολικής Αττικής (το 13% της περιφερειακής ενότητας) και της Μαγνησίας (το 1% της περιφερειακής ενότητας) (Σχέδια Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας). Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 2.10, παρουσιάζονται διαγραμματικά και ποσοστιαία οι περιφερειακές ενότητες του ΥΔ07.



Σχήμα 2.10: Ποσοστιαία κάλυψη Περιφερειακών Ενοτήτων της Εύβοιας (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2017, ίδια επεξεργασία)

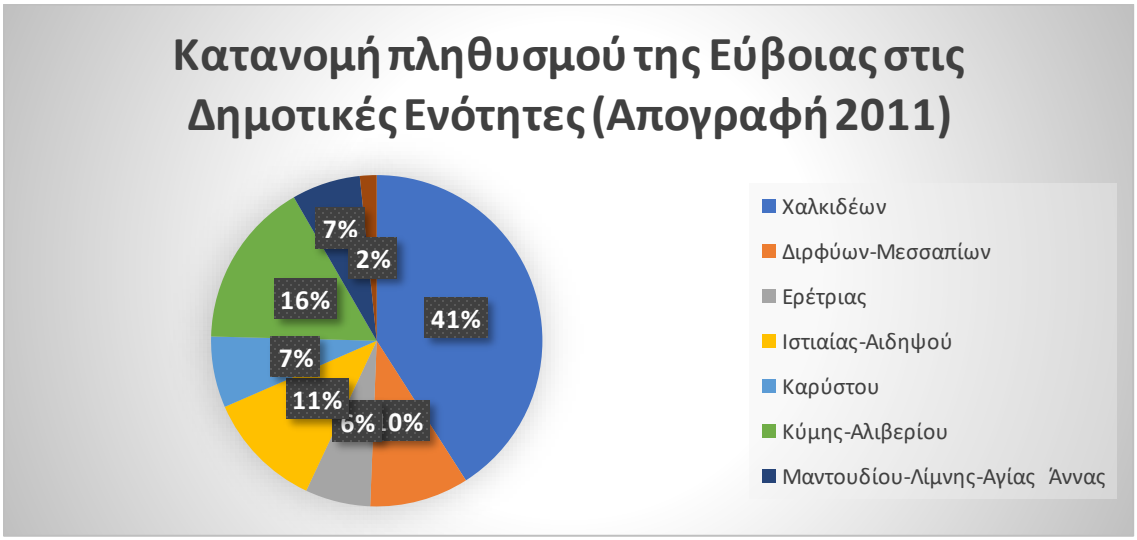
2.2.2 Πληθυσμός

Σύμφωνα με την απογραφή που έλαβε χώρα το 2011, η Ελλάδα αγγίζει τους 10816286 μόνιμους κατοίκους. Το 1.95% του συνολικού πληθυσμού διαμένει στην Εύβοια, αριθμός που καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικός (Απογραφή, 2011). Στον Πίνακα 2.2 και στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η κατανομή του πληθυσμού στους δήμους, στους οποίους χωρίζεται. Έπειτα, παρατίθεται η κατανομή πληθυσμού της Εύβοιας, βάσει της απογραφής που πραγματοποιήθηκε το 2001. Ο συνολικός αριθμός των ανθρώπων που κατοικούν εκεί, είναι 216339. Παρατηρείται πως μέσα

σε μία δεκαετία, υφίσταται η περιοχή μείωση πληθυσμού κατά 2.48% (ΕΛ. ΣΤΑΤ., 2001). Αναλυτικά δίνεται ο Πίνακας 2.3 και το Σχήμα 2.12.

Πίνακας 2.2: Κατανομή πληθυσμού στους δήμους της Εύβοιας (ΕΛ.ΣΤΑΤ. 2011)

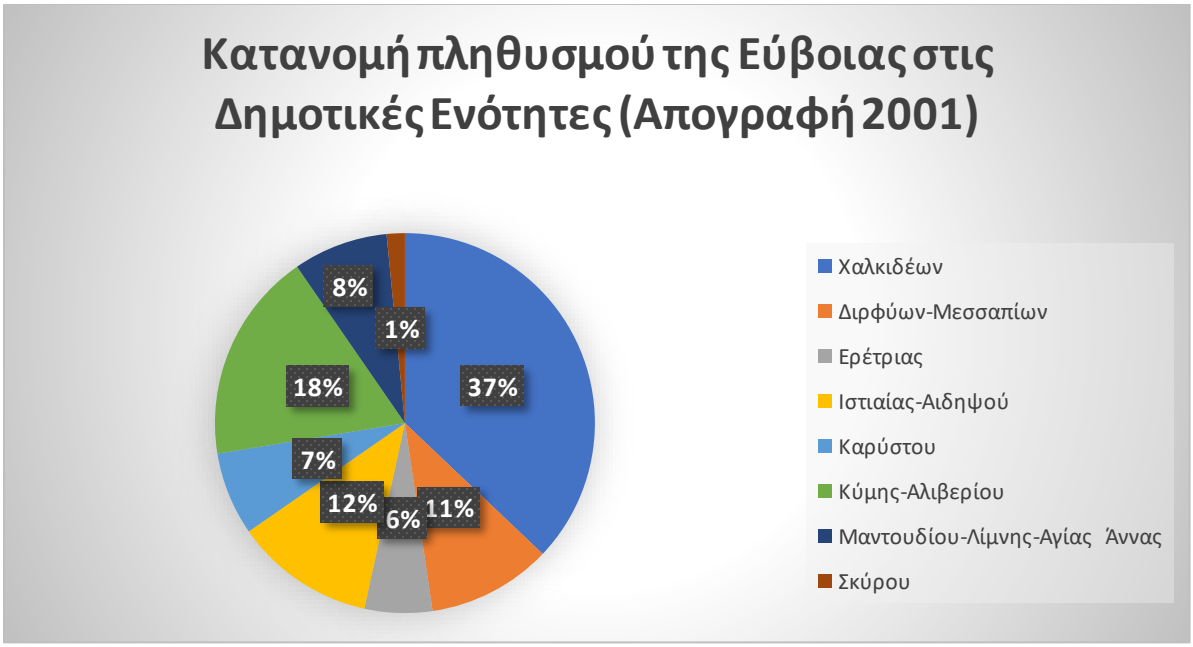
Δημοτικές ενότητες (ΟΤΑ 1997)	Μόνιμος πληθυσμός (Απογραφή ΕΛ. ΣΤΑΤ. 2011)
Χαλκιδέων	86.393
Διρφύων-Μεσσαπίων	20.415
Ερέτριας	13.423
Ιστιαίας-Αιδηψού	24.209
Καρύστου	14.643
Κύμης-Αλιβερίου	34.284
Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας	14.141
Σκύρου	3.449



Σχήμα 2.11: Κατανομή πληθυσμού της Εύβοιας ανά Δημοτική Ενότητα (Πηγή: ΕΛ.ΣΤΑΤ. 2011, ίδια επεξεργασία)

Πίνακας 2.3: Κατανομή πληθυσμού της Εύβοιας ανά Δημοτική Ενότητα (Πηγή: ΕΛ.ΣΤΑΤ. 2001, ίδια επεξεργασία)

Δημοτικές ενότητες (ΟΤΑ 1997)	Μόνιμος πληθυσμός (Απογραφή ΕΛ. ΣΤΑΤ. 2001)
Χαλκιδέων	80.223
Διρφύων-Μεσσαπίων	22.902
Ερέτριας	12.454
Ιστιαίας-Αιδηψού	25.777
Καρύστου	15.322
Κύμης-Αλιβερίου	38.855
Μαντουδίου-Λίμνης-Αγίας Άννας	17.457
Σκύρου	3.339



Σχήμα 2.12: Κατανομή πληθυσμού της Εύβοιας ανά Δημοτική Ενότητα (Πηγή: ΕΛ.ΣΤΑΤ. 2001, ίδια επεξεργασία)

2.2.3 Οικονομία

Το προτέρημα της Εύβοιας είναι ότι βρέχεται τόσο από το Αιγαίο Πέλαγος, όσο και από τον Ευβοϊκό Κόλπο, καθιστώντας την ιδιαίτερο τουριστικό προορισμό. Το μειονέκτημα από την άλλη, καθίσταται το γεγονός πως το προηγούμενο καλοκαίρι, κάηκε σχεδόν ολοκληρωτικά η Βόρεια Εύβοια. Συνεπώς, θα γίνει αναφορά για την οικονομία, πριν την καταστροφή που έλαβε χώρα. Σε πρώτη φάση, αναλύεται η δύναμη της Στερεάς Ελλάδας γενικότερα, στην Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία (Α.Π.Α) για την Ελλάδα. Η συμμετοχή της αγγίζει το ποσοστό της τάξεως του 4.5% του συνολικού (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2021). Στο Σχήμα 2.13, απεικονίζεται η συμμετοχή όλων των περιφερειών στην Ακαθάριστη Προστιθέμενη Αξία, το έτος 2018.

Σχήμα 2.13: Συμμετοχή Περιφερειών στην Α.Π.Α. (Πηγή: Ελληνική Στατιστική Αρχή 2021, ίδια επεξεργασία)

Εν συνεχεία, η διαφορά του Βόρειου τμήματος και του Νότιου, όσον αφορά στην ομορφιά και τη βλάστηση είναι τεράστια. Από τη μία δέντρα και δάση που αγγίζουν τη θάλασσα κυριολεκτικά, και από την άλλη απέραντα ξερά βουνά, τα οποία καλύπτονται μόνο από πουρνάρια και θάμνους. Συνεπώς, είναι κατανοητό ότι το θέμα της οικονομίας διαφέρει μεταξύ Βορρά και Νότου, με εξαίρεση το τουριστικό κομμάτι, το οποίο αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια κατά μήκος όλου του νησιού.

Ειδικά στη Βόρεια Εύβοια, σημαντικό ποσοστό του ελληνικού μελιού παράγεται εκεί. Επίσης, παράγεται ρητίνη, βασικά παράγωγα της οποίας είναι το νέφτι και το κολοφώνιο, ενώ χρησιμοποιείται και σε πλήθος άλλων εφαρμογών από τα βερνίκια μέχρι τα πλαστικά. Αναφορικά με την επίδρασή της στην οικονομία, επισημαίνεται πως περίπου 1000 οικογένειες ζουν από τη ρητινοκαλλιέργεια, ενώ κάθε έτος περίπου 5.5 εκατομμύρια ευρώ εισέρχονται στην οικονομία της Εύβοιας από αυτή. Ακόμα, δεν είναι λίγοι αυτοί, οι οποίοι ζουν και πορεύονται από το ψάρεμα στα ύδατα του Βόρειου τμήματος του νησιού. Τέλος, είναι γνωστά τα αποξηραμένα σύκα της ευρύτερης περιοχής, όπως και το λευκόλιθο. Χαρακτηριστικά, το ποσό σύκων Ταξιάρχη που αποξηραίνονται ανέρχεται σε 3040 τόνους, σε αντίθεση με την Κύμη, της οποίας επίσης είναι ιδιαίτερα γνωστά στην Ελλάδα και που δεν ξεπερνά τους 250 τόνους ετησίως (Φώτης Κόλλιας, 2021).

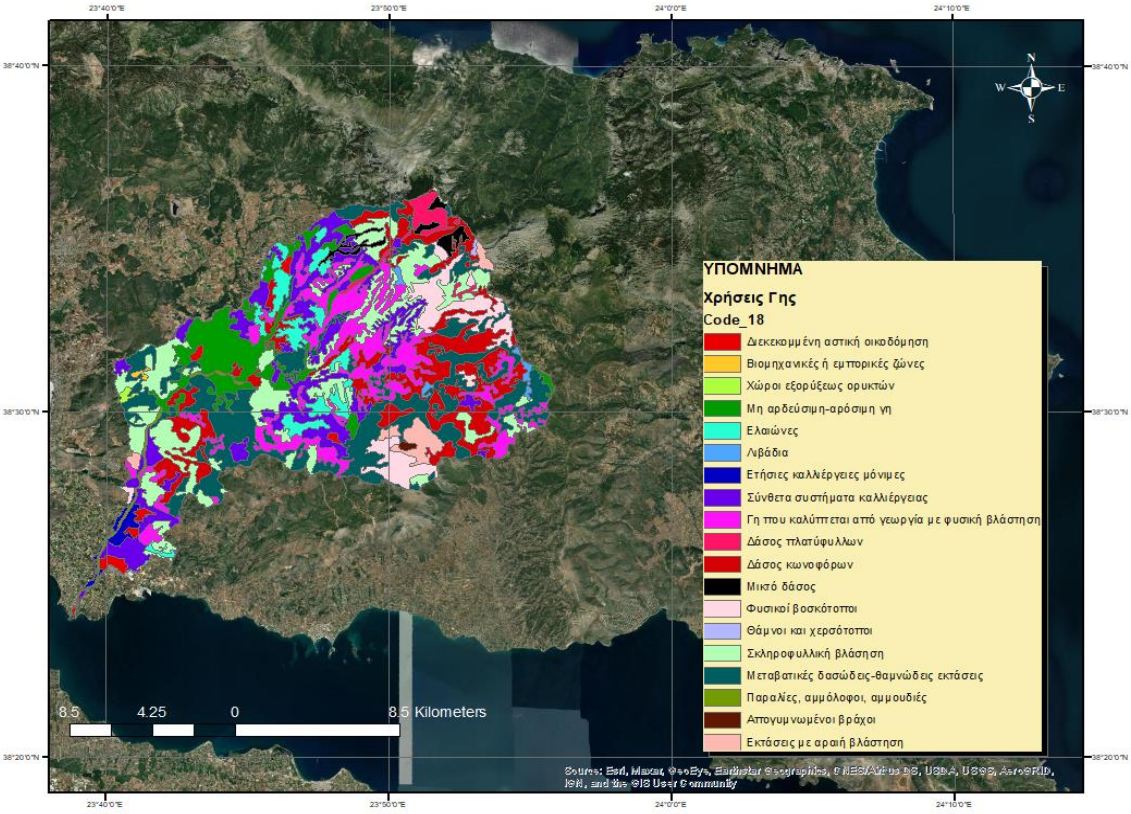
Αναφορικά με τη Νότια Εύβοια, η αγροτική αποτελεί τη βασικότερη ενασχόληση για τη διαβίωση. Στο μεγαλύτερο τμήμα της υπάρχουν πιστοποιημένοι ελαιώνες, που προορίζονται για παραγωγή λαδιού. Βέβαια, υπάρχει τεράστιο τμήμα γης που φυτεύεται σιτάρι, βαμβάκι,

όσπρια και ρεβύθια. Επίσης, παρατηρείται πως υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός επαγγελματιών ψαράδων, οι οποίοι βασίζονται στην καθημερινή ψαριά, ώστε να βγάλουν τα προς το ζην. Τέλος, υπογραμμίζεται ότι η Νότια Εύβοια καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική στο θέμα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, μόνο στη Νότια Καρυστία ήδη λειτουργούν 352 ανεμογεννήτριες, τοποθετημένες σε 34 αιολικά πάρκα, ενώ γίνονται συζητήσεις και ασκούνται πιέσεις, για την εγκατάσταση επιπλέον 209, οι οποίες θα διαμοιρασθούν σε 27 καινούρια αιολικά πάρκα (Σαράντης, Εφημερίδα των Συντακτών, 2017).

Η υπό μελέτη περιοχή συμβάλει σημαντικά στην οικονομία της Εύβοιας. Χαρακτηριστικά, οι κύριοι πόροι, που αποφέρουν χρήματα αποτελούν ο τουρισμός και η βιομηχανία. Συγκεκριμένα, τους θερινούς μήνες πολλοί τουρίστες επιλέγουν το παραθαλάσσιο τμήμα από τη μεριά του Ευβοϊκού κόλπου και ειδικά το Λευκαντί, το οποίο βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο εκβολής του ποταμού Λήλαντα. Από την άλλη μεριά και για όλο το χρόνο, δουλεύουν ασταμάτητα διάφορες βιομηχανίες, μερικές εκ των οποίων αποτελούν παραρτήματα διεθνών κολοσσών. Παράλληλα, δεν είναι μικρό το ποσοστό των μονίμων κατοίκων από Χαλκίδα μέχρι και Ερέτρια, οι οποίοι ζουν από αυτές.

2.2.4 Χρήσεις γης

Η περιοχή μελέτης, δύναται να χαρακτηριστεί ως αγροτική, καθώς το μεγαλύτερο μέρος της, εκμεταλλεύεται από τους αγρότες (Corine Land Cover) Σχήμα 2.14. Συγκεκριμένα, σχεδόν το 30 % της συνολικής έκτασης καλύπτεται από καλλιέργειες, σε αντίθεση με την αστική χρήση, η οποία αγγίζει το 1.3 %. Εν συνεχεία, τα λιβάδια και η αρόσιμη γη, καλύπτουν το 0.5 % και 8.1 % αντίστοιχα. Επιπλέον, οι φυσικοί βοσκότοποι εμφανίζονται κατά 5.6 %, οι θάμνοι και οι χερσότοποι κατά 0.08%, η σκληροφυλλική βλάστηση κατά 15.2 %, οι μεταβάσεις δασώδων και θαμνώδων εκτάσεων κατά 19.13 %, οι εκτάσεις με αραιή βλάστηση κατά 1.95 % και τέλος οι παραλίες και οι απογυμνωμένοι βράχοι συνδυαστικά κατά 0.76 %. Αναλυτικότερα, παρατίθεται η ποσοστιαία κατανομή κάλυψη γης των παραπάνω στο Σχήμα 2.15.



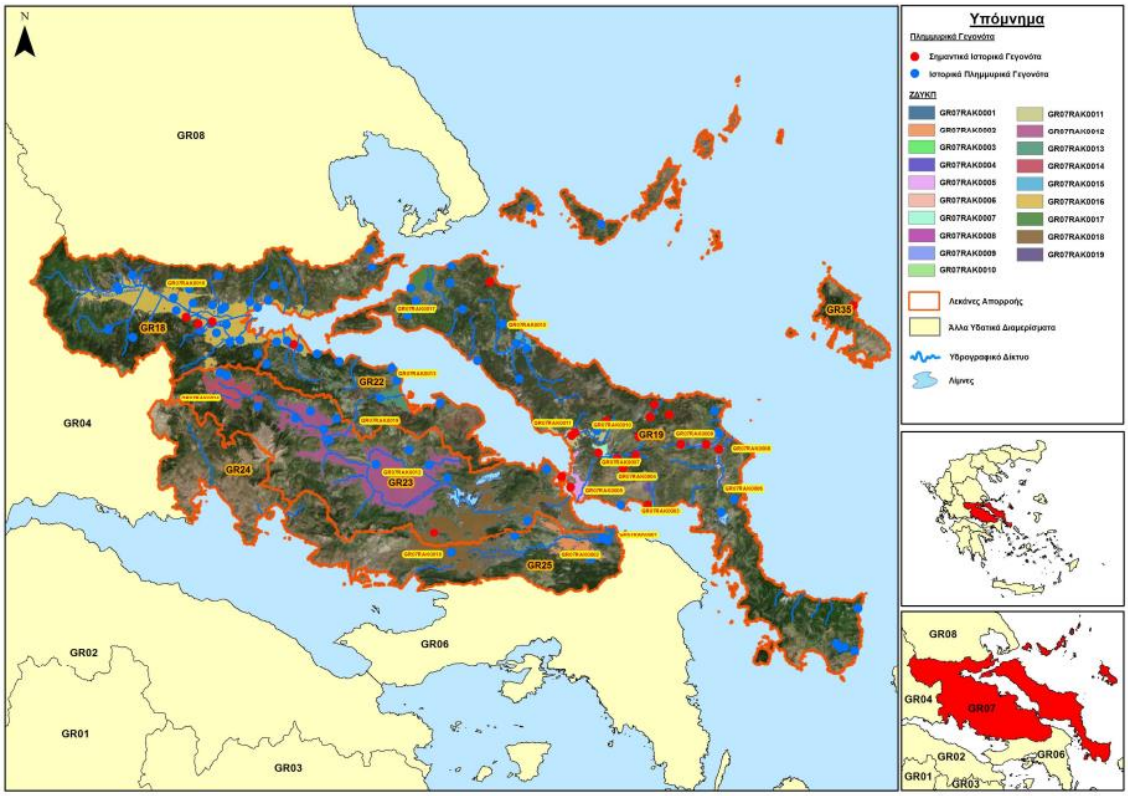
Σχήμα 2.14: Χάρτης των Χρήσεων Γης της λεκάνης απορροής (με χρήση του προγράμματος ArcMap) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Σχήμα 2.15: Ποσοστιαία κατανομή κάλυψης της γης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

2.3 Ιστορικό Πλημμυρών

2.3.1 Ιστορικές πλημμύρες ΖΔΥΚ

Βασικό στοιχείο για τη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας, αποτελεί η προσέγγιση των ιστορικών πλημμύρων που έχουν λάβει χώρα στην υπό εξέταση περιοχή (ΥΠΕΚΑ-ΕΓΥ, 2012). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16, δεν παρουσιάζονται συχνά έντονα πλημμυρικά φαινόμενα στην συγκεκριμένη περιοχή, καθώς οι εδαφικοί σχηματισμοί δεν ευνοούν τέτοιες καταστάσεις. Ωστόσο, ιστορικά έχουν πραγματοποιηθεί μερικά σημαντικά γεγονότα σε μεγάλα υψόμετρα στη λεκάνη απορροής, μέχρι το 2012, βάσει του Σχεδίου Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας (ΣΔΚΠ, 2018). Επιπλέον, έχουν καταγραφεί δύο ιστορικά συμβάντα, τα οποία χαρακτηρίζονται ως σημαντικά, που έλαβαν χώρα το 2009 και προέκυψαν, λόγω μεγάλου ύψους βροχής (ΥΠΕΚΑ-ΕΓΥ, 2012). Ένα από αυτά συνέβη το Σεπτέμβριο του 2009. Πιο αναλυτικά, ποταμοί, χείμαρροι και παραπόταμοι υπερχείλισαν, λόγω της καταρρακτώδους βροχής, η οποία επικράτησε από τις 22:00 την Παρασκευή 11 Σεπτεμβρίου, μέχρι και το Σάββατο 12 Σεπτεμβρίου στις 09:00 (evia 365, 2017). Ακόμη, αξιοσημείωτο καθίσταται το πλημμυρικό φαινόμενο που πραγματοποιήθηκε στις 8 Αυγούστου του 2020, το οποίο εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία, από το οποίο προκλήθηκαν υψίστης σημασίες ζημιές και γενικότερα καταστροφές.



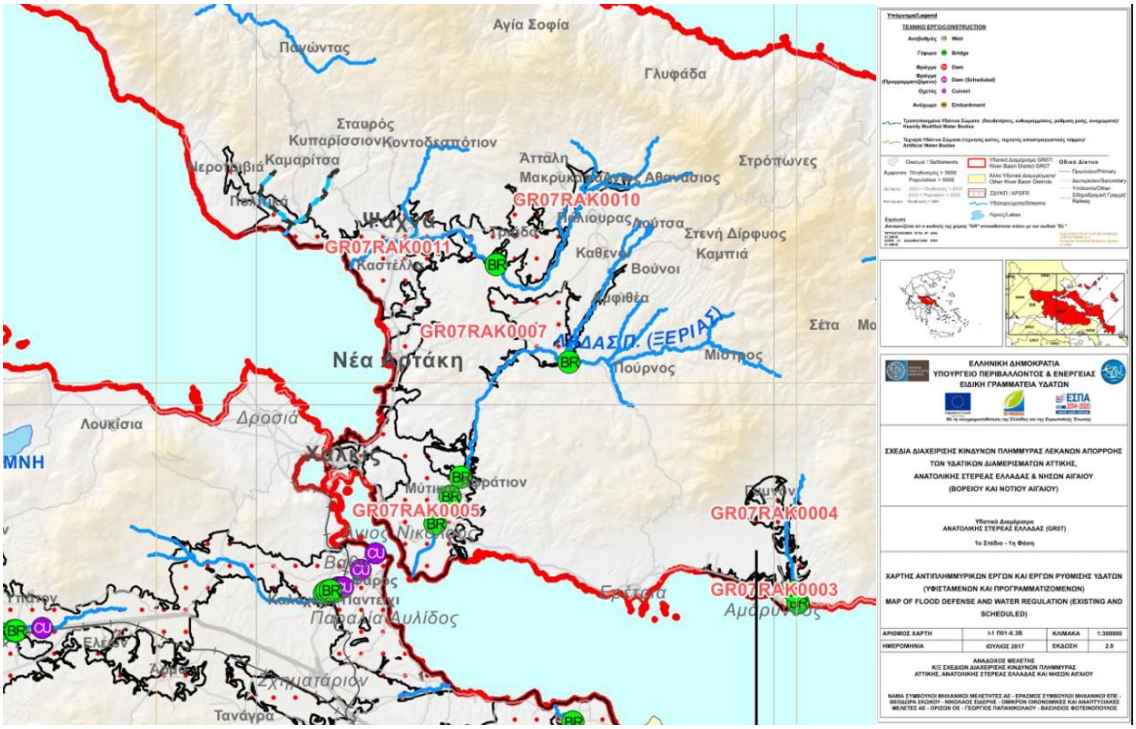
Σχήμα 2.16: Σημαντικές ιστορικές πλημμύρες Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (Πηγή: ΥΠΕΚΑ, 2019)

Τέλος, παρατηρείται πως η Εύβοια δεν καθίσταται ευάλωτη το ίδιο κατά μήκος της έκτασής της. Συγκεκριμένα, στο Βόρειο τμήμα, υφίσταται μόνο ένα σημαντικό πλημμυρικό γεγονός, ενώ συνολικά έχουν συμβεί αρκετές πλημμύρες, όμως όχι μεγάλης σημασίας. Στη συνέχεια, στο κεντρικό τμήμα του νησιού, εμφανίζονται πολλές πλημμύρες υψίστης σημασίας, ενώ είναι λίγες αυτές που δεν θεωρούνται σημαντικές. Τέλος, στο Νότιο τμήμα έχουν καταγραφεί μόνο πέντε πλημμύρες, εκ των οποίων καμία δεν θεωρείται σημαντική. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το Βόρειο τμήμα καλύπτεται σε μεγάλη έκταση από δασικές εκτάσεις. Στο κεντρικό δε, οι αρκετές εναλλαγές κλίσεων, σε συνδυασμό με τον τακτικό εμπρησμό που πραγματοποιείται τα περισσότερα καλοκαίρια, προκαλούν τις τόσες καταστροφικές πλημμύρες. Τέλος, το Νότιο τμήμα είναι κυρίως γυμνοί λόφοι και βράχοι, χωρίς πλούσια βλάστηση και πυκνών δασών, οπότε είναι λογική η σπάνια πρόκληση πλημμυρικού φαινομένου.

2.3.2 Μηχανισμοί πλημμύρας στην περιοχή μελέτης

Σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας της λεκάνης απορροής του ποταμού Λήλα, το κύριο αίτιο της πλημμύρας αποτελεί η υπερχείλιση του ποταμού, ενώ οι επικρατούντες μηχανισμοί πλημμύρας είναι η φυσική υπερχείλιση και η παρεμπόδιση ροής (ΥΠΕΚΑ-ΕΓΥ, 2012).

Στο Σχήμα 2.17, εκτός από το γεγονός ότι η περιοχή που εκβάλει ο ποταμός Λήλας καθίσταται ζώνη δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας, αναλύονται τα τεχνικά έργα που υπάρχουν στην περιοχή μελέτης (ΣΔΚΠ, 2017).



Σχήμα 2.17: Υφιστάμενα έργα της υπό μελέτη περιοχής (Πηγή: ΣΔΚΠ, 2017)

Εν προκειμένω, στην υπό εξέταση λεκάνη, συμπεριλαμβάνονται τέσσερις γέφυρες, οι οποίες διασχίζουν κάθετα τμήματα του υδρογραφικού δικτύου. Η πρώτη βρίσκεται σε μεγάλα υψόμετρα, κοντά στον Πούρνο. Έπειτα, υπάρχουν δύο μικρές γέφυρες, μέσω των οποίων συνδέεται το Βασιλικό με τα δύο μικρά χωριά Αφράτι και Μύτικα αντιστοίχως. Τέλος, η τέταρτη και τελευταία γέφυρα είναι αυτή που συναντάται στο Βασιλικό, η οποία αποτελεί κομμάτι του κύριου οδικού άξονα, ο οποίος κατευθύνεται προς τη Νότια Εύβοια.

Στην περίπτωση του πλημμυρικού φαινομένου που εξετάζεται, επισημαίνεται πως μόνο οι τρεις γέφυρες υπέστησαν σοβαρότατες υλικές ζημιές. Πιο αναλυτικά, η πρώτη και η πιο σημαντική είναι αυτή του Βασιλικού, η οποία θεωρήθηκε ακατάλληλη και εν τέλει πραγματοποιήθηκε διακοπή της κυκλοφορίας. Έπειτα, οι δύο συνδετικές με κατεύθυνση το Αφράτι και τον Μύτικα κατέρρευσαν σε αρκετά σημεία, με αποτέλεσμα τη δυσκολία προσέγγισης αυτών των περιοχών, μέσω άλλων δρόμων και για αρκετές ημέρες. Ακόμη, όσον αφορά στην πρώτη γέφυρα, σημειώνεται πως δεν υπήρξαν υλικές ζημίες, καθώς βρίσκεται σε μεγάλο υψόμετρο, οπότε δεν επηρεάστηκε τόσο από τους υδάτινους όγκους.

Τέλος, αξιοσημείωτο καθίσταται το γεγονός ότι δεν υπάρχουν εκτενέστερα αντιπλημμυρικά έργα. Δεν υπάρχει καμία κατασκευή κάποιου φράγματος ή αναβαθμών, όπως επίσης δεν υφίστανται αναχώματα ή οχετοί, μέσω των οποίων θα γινόταν αποτροπή πρόκλησης υλικών ζημιών ή εμφάνισης μεγάλων βάθων ροής στην ευρύτερη περιοχή.

2.3.3 Παρατηρήσεις επί των ληφθέντων αντιπλημμυρικών μέτρων στην περιοχή μελέτης

Παρόλο που το 2009, προκλήθηκαν ιδιαίτερα σημαντικές ζημιές στην υπό εξέταση περιοχή, μέσω της πλημμύρας του ποταμού Λήλα, δεν λήφθηκε κάποιο σοβαρό αντιπλημμυρικό έργο. Ωστόσο, πραγματοποιήθηκε κινητοποίηση των αρχών, λόγω της πλημμύρας του 2020, με σχέδια αντιπλημμυρικών έργων ύψους 13.6 εκατομμύρια ευρώ, μέρος των 240 εκατομμυρίων, που είναι το συνολικό κόστος αποκατάστασης. Μέσω της αίτησης της Περιφέρειας Στερεάς Ελλάδας και ύστερα από τη χρηματοδότησή τους, από το Πρόγραμμα Δημοσίων Επενδύσεων του 2020, λήφθηκαν τα παρακάτω έργα (Καρανάσιος, 2021).

Σε πρώτο στάδιο, έγινε καθαρισμός, άρση προσχώσεων και αποκατάσταση βλαβών τεχνικών έργων του ποταμού Λήλαντα και των παραποτάμων αυτού, ανάντη της γέφυρας των Φύλλων, που οδηγεί στο Αφράτι, με προϋπολογισμό 6.2 εκατομμύρια ευρώ. Αποτελεί έργο, που εκτείνεται σε μήκος περίπου 14 km από τη γέφυρα προς τις πηγές του ποταμού.

Στη συνέχεια, συνέβη το ίδιο, αλλά κατάντη της γέφυρας των Φύλλων, δηλαδή με κατεύθυνση τις εκβολές του Λήλαντα ποταμού. Το κόστος ανέρχεται στα 7.44 εκατομμύρια ευρώ, ενώ το μήκος υλοποίησης των έργων αγγίζει τα 5 km.

Τελικά, τα μετρά ολοκληρώνονται με την αποκατάσταση των βλαβών της επαρχιακής οδού 12, δηλαδή του τμήματος Αφράτι-Πισσώνας και με τη σύνδεση με την επαρχιακή οδό 44. Το ύψος του κόστους, εν προκειμένω, αγγίζει επίσης τα 5 εκατομμύρια ευρώ και το μήκος αποκατάστασης φτάνει τα 13 km, το οποίο είναι παράλληλα με τον ποταμό Λήλα.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

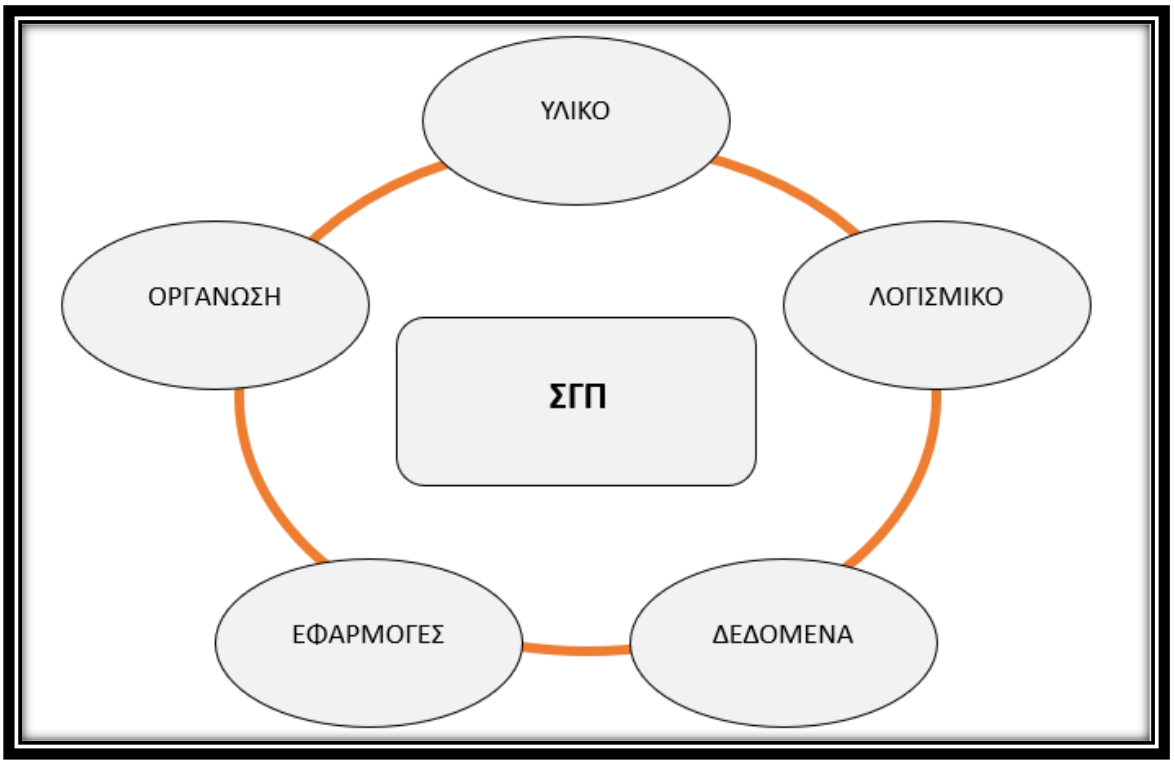
3.1 Περιβάλλοντα Εργασίας

3.1.1 Συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών – λογισμικό ArcMap

Η τεχνολογία των GIS, ArcMap επεξεργάζονται την τοπογραφική και γεωγραφική αποτύπωση και πληροφορία, σε ψηφιακή μορφή. Το λογισμικό αυτό αποτελεί σύνθετο σύστημα, το οποίο αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία (Κάβουρας, Κόκλα, 2016):

- Το υλικό, δηλαδή το σύστημα του υπολογιστή
- Το λογισμικό
- Τα δεδομένα
- Τις εφαρμογές
- Την οργάνωση

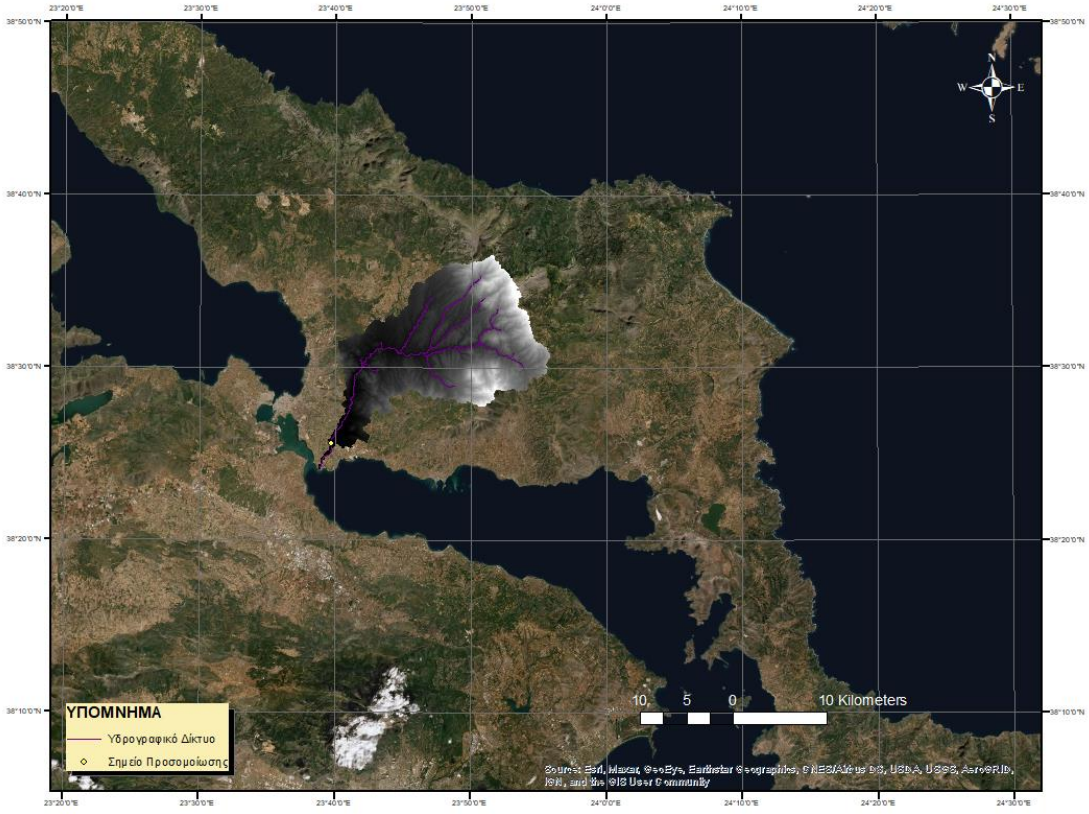
Πιο αναλυτικά, παρατίθεται σχηματικά η σχέση των επιμέρους στοιχείων του συγκεκριμένου λογισμικού στο Σχήμα 3.1.



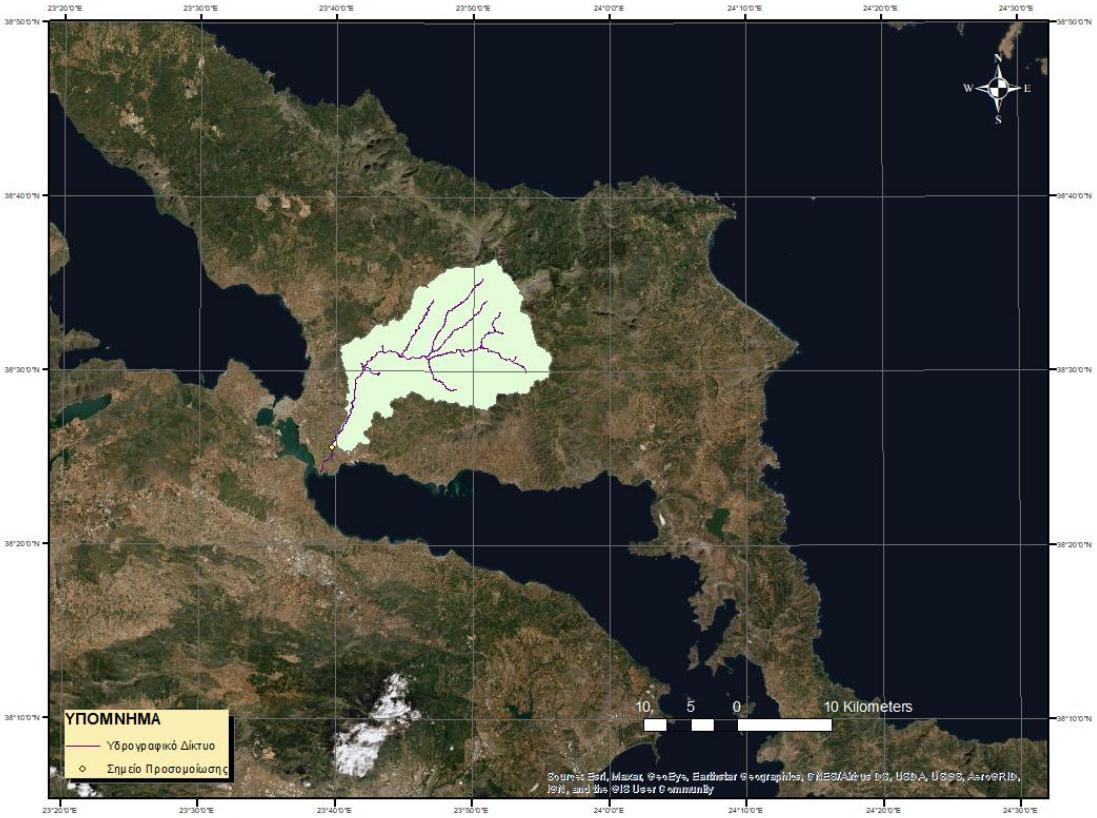
Σχήμα 3.1: Συστατικά στοιχεία ενός Σ.Γ.Π. (Πηγή: Κάβουρας κ.α., 2016, ίδια επεξεργασία)

Με χρήση του DEM της Στερεάς Ελλάδας (ακρίβειας 5 m x 5 m), δημιουργείται αρχικά ο κάναβος κλίσεων του εδάφους του νησιού της Εύβοιας, καθώς και ο αντίστοιχος κάναβος διεύθυνσης ροής. Βάσει της τελευταίας, προκύπτει ένα κανονικοποιημένο αρχείο των λεκανών απορροής, από τις οποίες απαρτίζεται ολόκληρη η Εύβοια. Στη συνέχεια, επιλέγεται η λεκάνη απορροής

της περιοχής μελέτης, δηλαδή αυτής που εκβάλει ο ποταμός Λήλαντας, με συνολική έκταση τα 252 km^2. Έχοντας απομονώσει πλέον τη λεκάνη απορροής ενδιαφέροντος, δημιουργείται ο κάναβος διεύθυνσης ροής της υπό μελέτης έκτασης και δημιουργείται ο κάναβος συγκεντρωτικής ροής, θέτοντας ως κατώφλι ουσιαστικά έναν ελάχιστο αριθμό pixels που θα πρέπει να συγκεντρώνονται, ώστε να αποτελεί ένα pixel μέρος του κεντρικού υδρογραφικού δικτύου. Ομαδοποιώντας τις περιοχές, όπου υπάρχει ή δεν υπάρχει ροή αντιστοίχως, προκύπτει το υδρογραφικό δίκτυο της ζητούμενης περιοχής. Τέλος, έχοντας επιλέξει το σημείο, όπου λαμβάνει χώρα η υδρολογική προσομοίωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, απομονώνεται η ανάντι λεκάνη απορροής, σύμφωνα με το Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.2: Υδρογραφικό δίκτυο και σημείο προσομοίωσης της λεκάνης απορροής (με χρήση του προγράμματος ArcMap) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 3.3: Ανάντη λεκάνη απορροής (με χρήση του προγράμματος ArcMap) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

3.1.2 Λογισμικό HEC-HMS

Το λογισμικό HEC-HMS, αποτελεί βασικό εργαλείο για την προσέγγιση ενός πλημμυρικού φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα, μέσω αυτού, γίνεται εκτίμηση του πλημμυρογραφήματος σχεδιασμού, με διάφορες μεθόδους που αναλύονται εκτενέστερα στη συνέχεια.

Τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου του προγράμματος χωρίζονται στα γεωχωρικά και στα αριθμητικά. Τα γεωχωρικά δεδομένα λαμβάνονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, που έχει προηγηθεί στο περιβάλλον του ArcMap και περιλαμβάνουν την ανάντη λεκάνη απορροής, το σημείο εξόδου της και το υδρογραφικό δίκτυο. Στη συνέχεια, καθορίζονται οι αριθμητικές τιμές των απαραίτητων παραμέτρων, ανάλογα με την επιλεγμένη μέθοδο προσδιορισμού του πλημμυρογραφήματος. Για την προσομοίωση επιλέγονται διάφορες μέθοδοι, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια. Βασικά αριθμητικά δεδομένα εισόδου, πέρα από αυτά των μεθόδων, αποτελούν το εμβαδό λεκάνης (252 km^2), καθώς και ο αριθμός CN για την εκτίμηση των απωλειών για τρία σενάρια προηγούμενης υγρασίας εδάφους (υγρές, κανονικές και ξηρές συνθήκες). Η τιμή του τελευταίου υπολογίζεται βάσει γεωλογίας και χρήσεων γης της λεκάνης που εξετάζεται και κατόπιν, γίνεται ανάλυση ευαισθησίας, έτσι ώστε να εξεταστεί το πόσο επηρεάζεται το αποτέλεσμα του πλημμυρογραφήματος, υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες εδάφους.

Τέλος, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό HEC-HMS, αποτελούν το πλημμυρογράφημα για το χρονικό βήμα που έχει επιλεχθεί, καθώς και οι ώρες αιχμής με τις αντίστοιχες παροχές. Επιπλέον, προκύπτει το συνολικό ύψος βροχής και τέλος η ένταση βροχής.

3.1.3 Λογισμικό HEC-RAS

Βασικό πρόγραμμα για τη διεξαγωγή της υδραυλικής προσομοίωσης στην παρούσα εργασία αποτελεί το HEC-RAS. Είναι λογισμικό ελεύθερης πρόσβασης, το οποίο αναπτύχθηκε από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (USACE). Δυνατότητες του προγράμματος, καθίστανται η υδραυλική προσομοίωση σε 1D και σε 2D η και σε 1D/2D, ενώ δύναται να εφαρμοστεί σε συνθήκες μόνιμης ή ανομοιόμορφης ροής. Εν προκειμένω, γίνεται χρήση του προγράμματος για ανομοιόμορφη ροή σε 2D. Παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα διαδραστικής χρήσης του προγράμματος, καθώς πραγματοποιείται αποθήκευση και διαχείριση των δεδομένων και εν συνεχεία, η αναπαράσταση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να απεικονίσει το πλημμυρικό πεδίο της υπό μελέτης περιοχής, σε συνδυασμό με τη βαθυμετρία, δηλαδή το βάθος ροής και με το προφίλ ταχυτήτων του ύδατος, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και σε κάθε σημείο του πεδίου (HEC-RAS 5.0 Reference Manual, 2016).

Η 2D υδραυλική προσομοίωση, λαμβάνει χώρα σε περιπτώσεις που υφίστανται δεδομένα DEM, καθώς και σε περιοχές με χαμηλές κλίσεις. Η διδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιείται και για περιπτώσεις κίνησης ροής προς δύο κατευθύνσεις ή ακόμα και για ανάλυση ταχύτητας ροής κοντά σε τεχνικά έργα. Τέλος, η προσομοίωση αυτή εφαρμόζεται και για ανάλυση θραύσης φράγματος ή αναχώματος, όπου η ροή αποκτά ξαφνικά πολλές κατευθύνσεις.

Στην περίπτωση της διδιάστατης ροής, η επίλυση του προβλήματος γίνεται βάσει των εξισώσεων συνέχειας και ποσότητας κίνησης, οι οποίες αποτελούν μαθηματική έκφραση της αρχής διατήρησης της μάζας και της ορμής αντιστοίχως. Οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξισώσεις Navier-Stokes, κατάλληλα ολοκληρωμένες, ώστε να προκύψουν για ρηχά νερά (Shallow Water Equations). Οι εξισώσεις Navier-Stokes, περιγράφουν την τρισδιάστατη κίνηση των ρευστών. Για αυτό, εφαρμόζονται απλοποιήσεις, ώστε τελικά να προσαρμοστούν για ρηχά νερά. Η απλοποιημένη επίλυση, γίνεται μέσω των εξισώσεων Saint-Venant, οι οποίες βασίζονται στις παραδοχές ασυμπίεστης ροής, ομοιόμορφης πυκνότητας και υδροστατικής πίεσης του ρευστού. Για συνθήκες μη μόνιμης ροής, η διαφορική μορφή της εξίσωσης ρηχών υδάτων διατήρησης μάζας είναι η εξής:

$$\frac{\delta H}{\delta t} + \frac{\delta (hu)}{\delta x} + \frac{\delta (hv)}{\delta y} + q = 0 \qquad (3.1)$$

Όπου:

t: χρόνος

H (x, y, t) (m): υψόμετρο στάθμης ύδατος

h (x, y, t) (m): βάθος ύδατος

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

q (m^3/s): εισερχόμενη ροή

Οι 2D εξισώσεις ποσότητας κίνησης ρηχών υδάτων (Saint Venant), για τις διευθύνσεις x Και y αντίστοιχα, αποτελούν:

$$\frac{\delta u}{\delta t} + u\frac{\delta u}{\delta x} + v\frac{\delta u}{\delta y} = -g\frac{\delta H}{\delta x} + v_t\left(\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 u}{\delta y^2}\right) - c_f u + f_v \quad (3.2)$$

$$\frac{\delta v}{\delta t} + u\frac{\delta v}{\delta x} + v\frac{\delta v}{\delta y} = -g\frac{\delta H}{\delta y} + v_t\left(\frac{\delta^2 v}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 v}{\delta y^2}\right) - c_f v + f_u \quad (3.3)$$

Όπου:

u, v (m/s): συνιστώσες ταχύτητας στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα

g (m/s^2): επιτάχυνση της βαρύτητας

H (x, y, t) (m): υψόμετρο στάθμης νερού

v_t (m^2/s): συντελεστής οριζόντιου κινηματικού ιξώδους

c_f (s^{-1}): συντελεστής τριβής στον πυθμένα

f (s^{-1}): παράμετρος Coriolis

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις ροής ρηχών υδάτων, το ιξώδες, η παράμετρος Coriolis και η τοπική και μεταγωγική επιτάχυνση δεν λαμβάνονται υπόψιν, ενώ αντίθετα, η επιτάχυνση της βαρύτητας και ο συντελεστής τριβής στον πυθμένα αποτελούν βασικές παράμετροι για τις εξισώσεις κίνησης. Σε τέτοια σενάρια, γίνεται αναγωγή των εξισώσεων σε διδιάστατη μορφή (Diffusion Wave Approximation). Οι εξισώσεις για την περίπτωση του Diffusion Wave Approximation of the Shallow Water (DSW), είναι οι ακόλουθες (USACE, 2016):

$$-g\frac{\delta H}{\delta x} = c_f u \quad (3.4)$$

$$-g\frac{\delta H}{\delta y} = c_f v \quad (3.5)$$

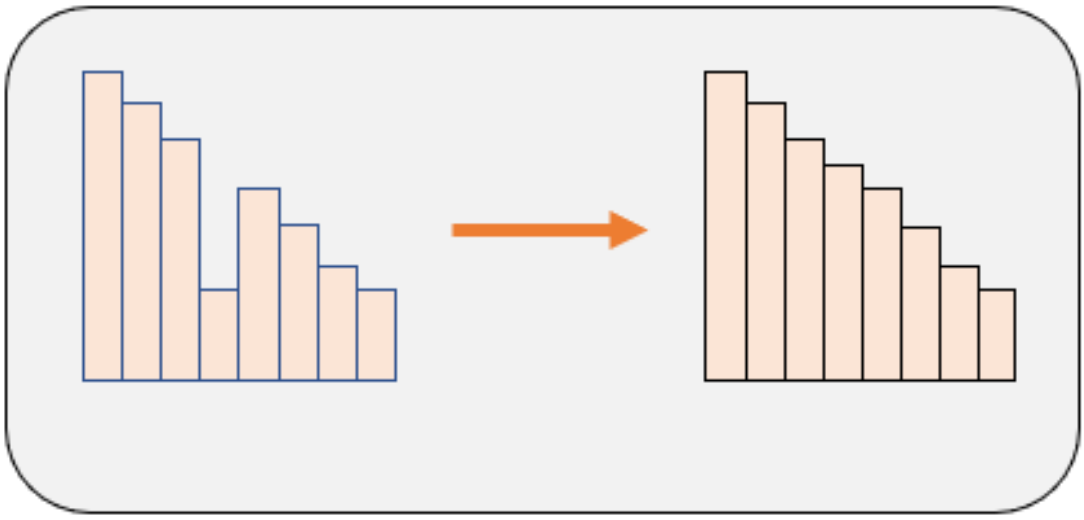
3.2 Γεωμορφολογική Ανάλυση

3.2.1 Ορισμός υδρογραφικού δικτύου

Σε πρώτο στάδιο, παραχωρήθηκαν από την υπηρεσία του Κτηματολόγιο Α.Ε. κανονικοποιημένα αρχεία Raster, που αποτελούν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους για την περιοχή της Στερεάς Ελλάδας και της Εύβοιας ειδικότερα. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι ακρίβειας 5 m x 5 m.

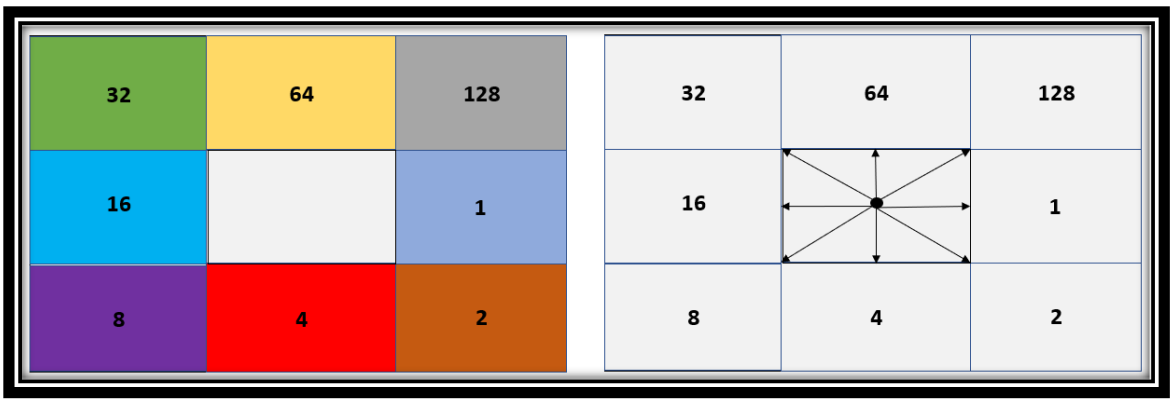
Για την παραγωγή του υδρογραφικού δικτύου, προηγήθηκαν διάφορες εργασίες στο περιβάλλον του λογισμικού ArcMap, οι βασικότερες εκ των οποίων αναλύονται διεξοδικά.

Πρώτα, πραγματοποιείται η διόρθωση των βυθισμάτων του κανάβου (Fill Sink). Με άλλα λόγια, επιδιορθώνονται οι ατέλειες του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, που αποτρέπουν την απορροή των pixel όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



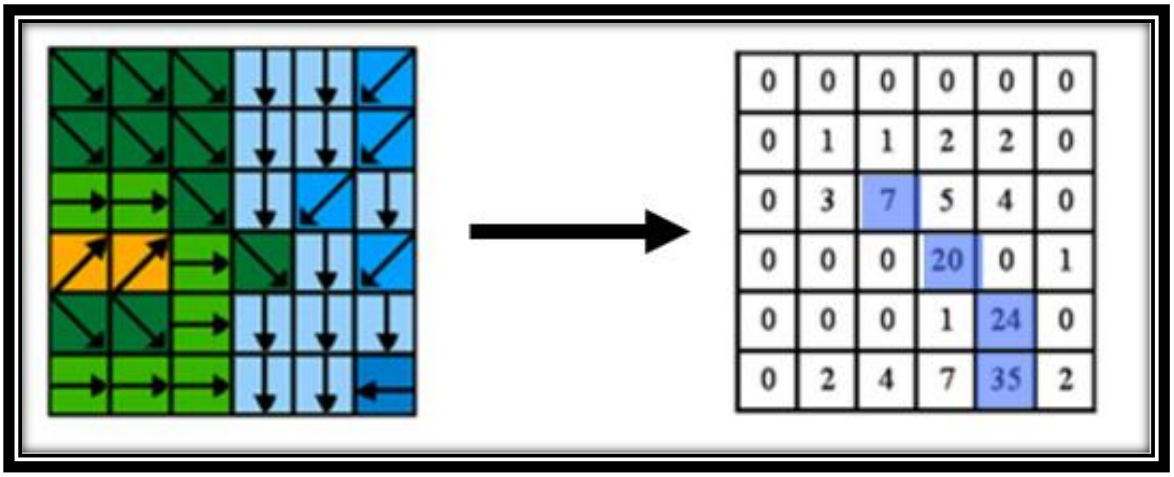
Σχήμα 3.4: Πλήρωση βυθισμάτων κανάβου (Πηγή: Μπαλτάς και Μπουρνάς, 2021, ίδια επεξεργασία)

Στη συνέχεια, κατασκευάζεται ο κάναβος της διεύθυνσης ροής (Flow Direction). Αναλυτικά, μέσω της διαδικασίας αυτής, δημιουργείται καινούριο raster, στο οποίο οι τιμές των φατνίων έχουν μοναδικό νούμερο, ανάλογα με τη διεύθυνση που ακολουθεί μία σταγόνα εφόσον βρίσκεται εντός του φατνίου. Παράλληλα, υπολογίζεται η κλίση του κάθε φατνίου με των οκτώ γειτονικών, και επιλέγεται η μεγαλύτερη κλίση όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Επεξεργασία κανάβου διεύθυνσης ροής (Πηγή: Μπαλτάς και Μπουρνάς, 2021, ίδια επεξεργασία)

Έπειτα, λαμβάνει χώρα ο κάναβος της συγκέντρωσης της ροής (Flow Accumulation). Το αποτέλεσμά της συνίσταται η κατασκευή νέου raster, όπου οι τιμές των φατνίων του ορίζουν τον αριθμό των φατνίων που απορρέουν στο συγκεκριμένο φατνίο. Είναι βασικό στάδιο για το υδρογραφικό δίκτυο, αφού τα φατνία με τις μεγαλύτερες τιμές, αποτελούν μέλη του υδρογραφικού δικτύου. Στο Σχήμα 3.6, απεικονίζεται η μετατροπή της διεύθυνσης ροής σε συγκέντρωση ροής (Esri, ArcGIS Help).



Σχήμα 3.6: Επεξήγηση κανάβου συγκεντρωτικής ροής (Πηγή: pro.arcgis.com, ίδια επεξεργασία)

Ακόμη, ορίζονται τα υδατορέματα (Stream Definition). Σε αυτό το στάδιο, ορίζονται τα κελιά, τα οποία αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο. Κάθε φατνίο που συγκεντρώνει απορροή πάνω από το όριο που έχει επιλεχθεί θεωρείται μέρος του. Όσο μικρότερη είναι η τιμή που θα οριστεί ως κατώφλι, τόσο πυκνότερο θα βγει το δίκτυο, το οποίο θα παραχθεί. Αντίστοιχα, ένα μικρό κατώφλι οδηγεί σε αραιό υδρογραφικό δίκτυο. Με αυτο τον τρόπο παράγεται ο κάναβος ρεμάτων. Βασικές παράμετροι για τον ορισμό του κατωφλιού, αποτελούν η έκταση της λεκάνης με τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, ο έλεγχος με δορυφορικές εικόνες ή ακόμα και με χαρτογραφικά υπόβαθρα.

Ύστερα, γίνεται κατάτμηση του υδρογραφικού δικτύου (Stream Segmentation). Σε αυτό το βήμα, ο κάναβος ρεμάτων που προκύπτει από τα παραπάνω, επιμερίζεται σε κλάδους. Στις συμβολές δημιουργούνται κόμβοι και ανάμεσα σε δύο κόμβους ορίζεται ένα μοναδικό τμήμα του υδρογραφικού, που καλείται κλάδος. Προφανώς, το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί ένας κάναβος των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου.

Τέλος, απαιτείται η διανυσματοποίηση. Πρόκειται για μια διαδικασία, μέσω της οποίας το υδροραφικό δίκτυο μετατρέπεται σε διανυσματική μορφή. Με δεδομένα εισόδου τον κάναβο των κλαδών που έχουν προηγηθεί, καθώς και τον κάναβο κατεύθυνσης της ροής, προκύπτει το αποτέλεσμα.

3.2.2 Ορισμός λεκάνης και υπολεκάνης απορροής

Η προσέγγιση και τελικά η ορισμός της υπό μελέτη λεκάνης και εν συνεχεία της υπολεκάνης απορροής, υλοποιείται στο περιβάλλον ArcMap.

Αρχικά, γίνεται η χάραξη των λεκανών απορρής (Catchment Grid Delineation). Μέσω της μεθόδου αυτής, χαράσσεται η λεκάνη απορροής της ζητούμενης έκτασης. Για κάθε κλάδο και τμήμα του υδρογραφικού δικτύου που εντοπίστηκε, χαράσσεται ο υδροκρίτης, αξιοποιώντας το αποτέλεσμα του κανάβου διεύθυνσης απορροής, που προηγήθηκε. Αποτέλεσμα της διαδικασίας, αποτελεί ο κάναβος με κελιά, τα οποία επιμερίζονται σε κατάλληλες ομάδες στην έκταση της υπολεκάνης του κάθε κλάδου του υδρογραφικού δικτύου.

Τέλος, δημιουργούνται πολύγωνα στη λεκάνη απορροής (Catchment Polygon Processing). Εν προκειμένω, περιλαμβάνεται η διανυσματοποίηση που έγινε παραπάνω με τις υπολεκάνες, όπως προέκυψε προηγουμένως και επιλέγεται η υπολεκάνη ανάντη του σημείου προσομοίωσης που ορίζουμε.

3.3 Υδρολογική Ανάλυση

Η υδρολογική ανάλυση συνίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τα αποτελέσματά της παρουσιάζουν την υδρολογική απόκριση της υπολεκάνης που εξετάζεται και αποτελούν δεδομένα εισόδου για το λογισμικού HEC-RAS, όπου γίνεται η υδραυλική προσομοίωση κατάντη της εξόδου της υπολεκάνης . Για την υδρολογική ανάλυση εξετάζονται τρεις μέθοδοι μετασχηματισμού βροχής σε απορροή (USH, συνθετικό ΜΥΓ κατά Snyder και αδιάστατο ΜΥΓ κατά SCS. Πρακτικά, για τις παραπάνω τρεις μεθόδους, εξάγεται ως αποτέλεσμα, το απαιτούμενο πλημμυρογράφημα στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης απορροής.

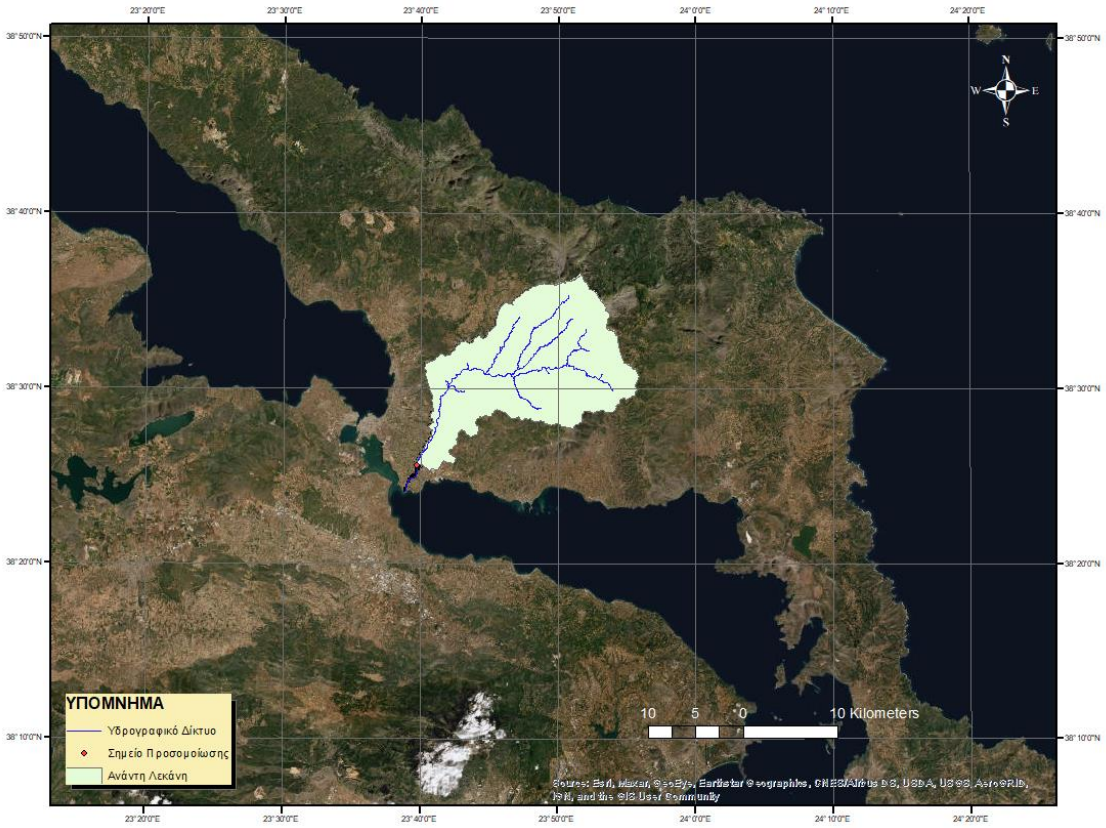
3.3.1 Επιλογή και εξαγωγή υπολεκάνης για την υλοποίηση της υδρολογικής ανάλυσης

Με την υδρολογική ανάλυση, περιγράφονται οι υδρολογικές συνθήκες στην υπολεκάνη απορροής του ποταμού και υπολογίζεται η πλημμυρική παροχή με την εξαγωγή του πλημμυρογραφήματος στην έξοδό της. Από την ανάλυση προκύπτει η παροχή σχεδιασμού του ποταμού, βάσει της οποίας ορίζονται οι γραμμές πλημμύρας. Το πλημμυρογράφημα αποτελεί ένα από τα δεδομένα εισόδου της υδραυλικής προσομοίωσης.

Σύμφωνα με το ΦΕΚ ΚΥΑ, η υδρολογική μελέτη βασίζεται στην αξιοποίηση είτε υδρομετρικών δεδομένων (δεδομένων στάθμης/παροχής του ποταμού) της ίδιας της λεκάνης, εφόσον υπάρχουν, είτε πιο συχνά στα βροχομετρικά δεδομένα. Στην περιοχή μελέτης πραγματοποείται αξιοποίηση δεδομένων μέσα στη λεκάνη, με βροχομετρικά δεδομένα.

Η παρούσα μελέτη αφορά την ολοκληρωμένη προσέγγιση για πλημμυρικό φαινόμενο στον ποταμό Λήλα που υπάγεται στο Βασιλικό Εύβοιας, το οποίο συνέβη τον Αύγουστο του 2020. Για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, πραγματοιποιείται διερεύνηση για διάφορες υδρολογικές συνθήκες. Εκτός από τις εναλλακτικές υδρολογικές συνθήκες, εξετάζεται το πλημμυρικό φαινόμενο με διάφορες υδρολογικές μεθόδους.

Το σημείο ενδιαφέροντος, στο οποίο θα γίνει η προσομοίωση, καθώς και ο διαχωρισμός της ανάντη υπολεκάνης εντός της λεκάνης απορροής του Λήλαντα ποταμού, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7. Επιπλέον, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά για την υπολεκάνη απορροής παρατίθενται στον Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.7: Διαχωρισμός ανάντη λεκάνης απορροής (με χρήση του προγράμματος ArcMap) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Πίνακας 3.1: Τοπογραφικά στοιχεία της υπολεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης

Έκταση (km^2)	251
Μέγιστο υψόμετρο (m)	1411
Ελάχιστο υψόμετρο (m)	10
Μέσο υψόμετρο (m)	351
Μέση κλίση (^{o})	21
Μήκος κύριας μισγάγγειας (km)	34

3.3.2 Το μοντέλο του μοναδιαίου υδρογραφήματος

Για την εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής και για την κατανομή της πλημμύρας γενικότερα, γίνεται χρήση του μοναδιαίου υδρογραφήματος, το οποίο εισήχθηκε στην υδρολογική επιστήμη για πρώτη φορά από τον Sherman (1932).

Αρχικά, μοναδιαίο υδρογράφημα καλείται το υδρογράφημα απορροής, το οποίο προκύπτει από ενεργό βροχόπτωση μοναδιαίου ύψους 10 mm και συγκεκριμένης διάρκειας, η οποία είναι κατανεμημένη ομοιόμορφα σε όλη την έκταση της λεκάνης. Η ένταση αποτελεί και αυτή ομοιόμορφη.

Οι παραδοχές που ακολουθεί η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι οι εξής (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018):

1. Σε 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 δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μία συγκεκριμένη βροχή, είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες βροχές ή τις επόμενες.
3. Η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη, σε σχέση με το χρόνο.

Αναφορικά με την πρώτη παραδοχή, σημειώνεται ότι η αποθηκευτική ικανότητα των ρεμάτων μεγαλώνει, όσο η στάθμη του νερού αυξάνει. Δηλαδή, για βροχές ίδιας διάρκειας, όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της βροχής, τόσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος που αποθηκεύεται στα ρέματα.

Σχετικά με τη δεύτερη, επισημαίνεται ότι η απορροή επηρεάζεται από τις βροχές που έχουν προηγηθεί. Οι προηγούμενες βροχές αποτελούν ουσιαστικό παράγοντα για τη βασική απορροή, ακόμα και αν έπεσαν αρκετό χρόνο πριν. Για αυτό το λόγο, το μοναδιαίο υδρογράφημα δεν μπορεί να εφαρμοστεί στο σύνολο της απορροής, αλλά μόνο στην άμεση απορροή, δηλαδή στο μέρος του υδρογραφήματος, που μένει μετά την αφαίρεση της βασικής απορροής.

Τέλος, όσον αφορά την τελευταία παραδοχή, αναφέρεται ότι μόνο σε περίπτωση ανθρώπινης επέμβασης, δηλαδή μέσω κατασκευών έργων ή φυτοκαλύψεων, μπορεί να μεταβληθεί η υδρολογική κατάσταση των λεκανών, σε λογικά χρονικά διαστήματα.

Εν συνεχεία, τα βασικά χαρακτηριστικά του μοναδιαίου υδρογραφήματος, αποτελούν η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Σύμφωνα με την πρώτη, δύο ενεργές βροχές ίδιας διάρκεια, 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. Ακόμη, η αρχή αυτή, είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη γραμμικότητα της λεκάνης, όπου δηλαδή οι όγκοι της απορροής είναι ευθέως ανάλογοι των όγκων βροχής. Τέλος, η χρονική αρχή των επιμέρους υδρογραφημάτων που αθροίζονται, ταυτίζεται με την αρχή των αντίστοιχων επεισοδίων ενεργού βροχόπτωσης (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018). Σύμφωνα με τη δεύτερη αρχή, το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις, είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018).

Υδρογράφημα απορροής, ονομάζεται το διάγραμμα εκείνο, το οποίο είναι συνάρτηση της παροχής του υδατορέματος και του χρόνου, για μία συγκεκριμένη θέση.

Στο Σχήμα 3.8, παρουσιάζεται ένα τυπικό υδρογράφημα ενός επεισοδίου πλημμύρας, όπως και το υετογράφημα της βροχής. Είναι προφανές, ότι πριν αρχίσει η ενεργός βροχόπτωση, η παροχή του ποταμού ελαφρώς φθήνει, συναρτήσει του χρόνου. Το τμήμα ΑΒ, καλείται κλάδος στείρευσης της βασικής ροής και αντιπροσωπεύεται η βασική απορροή του ποταμού, η οποία

είναι φθίνουσα, στα διαστήματα μεταξύ των πλημμυρικών επεισοδίων. Στο χρόνο tΛ ≡ tΒ, που ξεκινά η ενεργός βροχόπτωση, η παροχή του υδατορέματος αρχίζει να αυξάνει έντονα. Στη συνέχεια, εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της, στο χρόνο αιχμής tΓ, που είναι μεταξύ του σημείου έναρξης του υδρογραφήματος και της αιχμής του. Για βραχυπρόθεσμα επεισόδια βροχής, έπεται της λήξης της ενεργούς βροχής. Αντίστοιχα, για μακρυπρόθεσμα επεισόδια βροχής, ο χρόνος αυτός ενδέχεται να ταυτίζεται με το χρόνο λήξης της ενεργούς βροχής tΜ. Στη συνέχεια, ο κλάδος ΒΓ του υδρογραφήματος, ορίζεται ως ανοδικός. Το σημείο Γ καλείται αιχμή του υδρογραφήματος και η παροχή για χρόνο tΓ, λέγεται παροχή αιχμής. Έπειτα, ο κλάδος ΓΔ ονομάζεται καθοδικός, ενώ στο χρόνο tΔ παύει η άμεση απορροή, ενώ συνεχίζει η βασική και έτσι προκύπτει ένας νέος κλάδος στείρευσης ΔΕ.

Πιο συγκεκριμένα, η άμεση απορροή υφίσταται μόνο στο χρονικό διάστημα (tΒ, tΔ), ενώ η βασική απορροή είναι διαρκής. Αναλυτικότερα, οι χρονικές διάρκειες είναι οι εξής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016):

- ✓ Διάρκεια πλημμύρας ή χρόνος βάσης:

$$tb = t\Delta - tB \tag{3.6}$$

- ✓ Χρόνος ανόδου:

$$t\alpha = t\Gamma - tB \tag{3.7}$$

- ✓ Χρόνος υστέρησης αιχμής:

$$tL = t\Gamma - tS \tag{3.8}$$

- ✓ Χρόνος υστέρησης κεντροβαρικός:

$$t'L = tR - tS \tag{3.9}$$

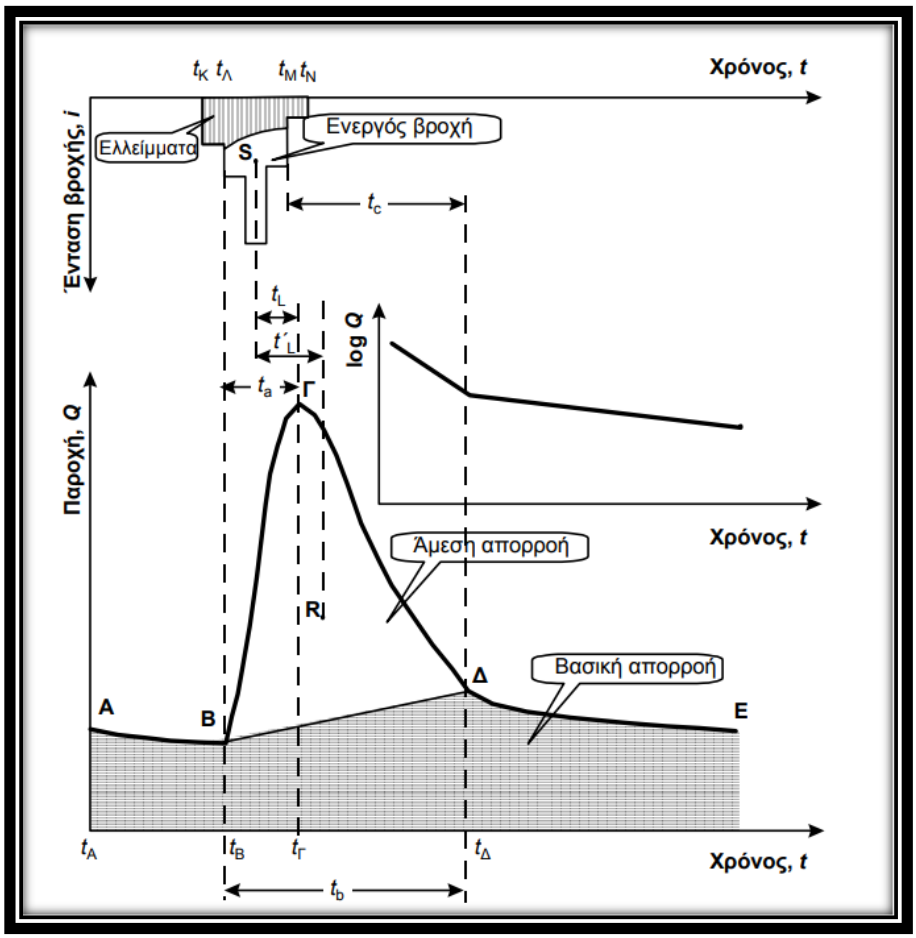
Όπου:

tR: ο χρόνος που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους του υδρογραφήματος άμεσης απορροής

ts: ο χρόνος που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους S του ενεργού υετογραφήματος

- ✓ Χρόνος συγκέντρωσης:

$$tc = t\Delta - tM \tag{3.10}$$



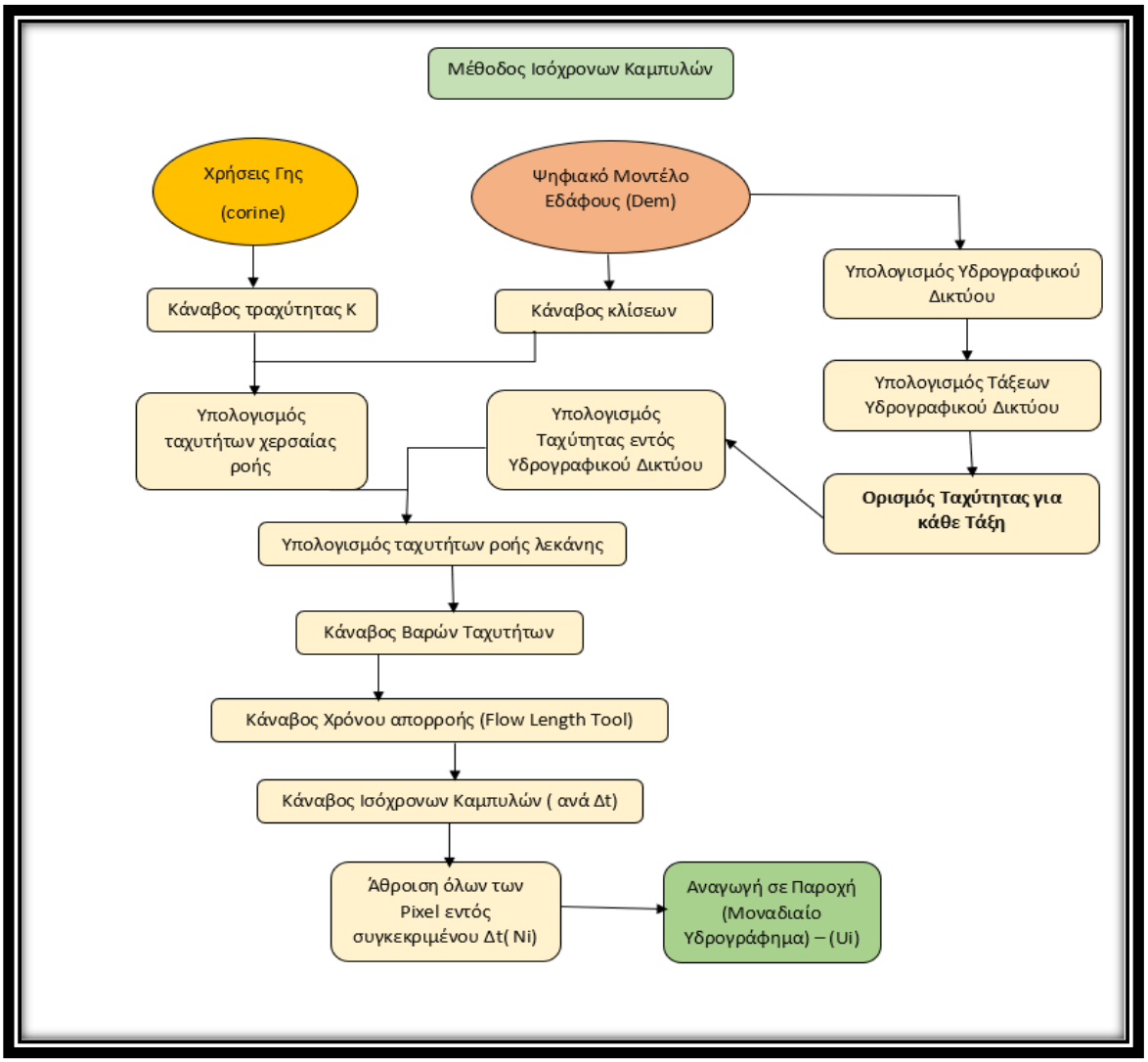
Σχήμα 3.8: Σκαρίφημα τυπικού υδρογραφήματος απορροής με το αντίστοιχο υετογράφημα (Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 2016)

3.3.3 Εκτίμηση μοναδιαίου υδρογραφήματος με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών

Η υδρολογική ανάλυση, ξεκινά με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών. Σκοπός της μεθόδου αποτελεί η διαμόρφωση του ΜΥΓ, το οποίο βασίζεται στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Πρακτικά, κατασκευάζονται ισόχρονες καμπύλες, δηλαδή υπολογισμός τμημάτων εντός της περιοχής μελέτης, που απορρέουν στο ίδιο χρονικό βήμα.

Η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών βασίζεται στο ιστόγραμμα επιφάνειας-χρόνου, μέσω του οποίου εκφράζεται η σχέση μεταξύ του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής, για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Δηλαδή, διαχωρίζεται η λεκάνη σε υπολεκάνες με καμπύλες, οι οποίες καλούνται ισόχρονες (Χριστοφίδης, 2008). Ισόχρονες καμπύλες ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων, όπου οι σταγόνες της βροχής ενός επεισοδίου απέχουν την ίδια απόσταση από την έξοδο της λεκάνης σε χρονικό επίπεδο (Καββαδά, 2012). Δεν υπάρχει διασταύρωσή τους, διότι η κάθε καμπύλη περιλαμβάνει σημεία

διαφορετικής χρονικής απόστασης από το σημείο της εξόδου της λεκάνης, ενώ μπορούν να εκτείνονται μόνο εντός των ορίων της (Dooge, 1959). Η μέθοδος αυτή αξιοποιείται για τον μετασχηματισμό της ενεργού βροχόπτωσης σε απορροή, λαμβάνοντας υπόψιν τον απαιτούμενο χρόνο, ώστε το νερό να φτάσει από όλα τα σημεία της λεκάνης στην έξοδο. Για την υπό μελέτη λεκάνη, η μέθοδος αυτή λαμβάνει χώρα στο περιβάλλον ArcMap και εν συνεχεία στο λογισμικό HEC-HMS. Το DEM, ο χάρτης χρήσεων γης (Corine, 2012), όπως και το υδρογραφικό δίκτυο, συνίσταται τα δεδομένα εισόδου αυτής της μεθόδου. Στο Σχήμα 3.9 γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των επιμέρους διαδικασιών, που λαμβάνουν χώρα στη συγκεκριμένη μέθοδο.



Σχήμα 3.9: Στάδια υλοποίησης της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών σε περιβάλλον GIS (Πηγή: Μπαλτάς και Μπουρνάς, 2021, ίδια επεξεργασία)

Σχετικά με τις επιφανειακές καλύψεις κατά Corine, επισημαίνεται πως μετασχηματίζεται σε ένα νέο raster, ανάλογα με το συντελεστή τραχύτητας του εδάφους (k), το οποίο αντιστοιχεί στην εκάστοτε κατηγορία χρήσης γης. Στον Πίνακα 3.2, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους, πολλαπλασιασμένες επί 100 (k100), οι οποίες

αντιστοιχούν σε διαφορετική κατηγορία. Το μέγεθος των φατνίων ορίζεται να είναι 5 m x 5 m, ώστε να συμπίπτει με το μέγεθος αυτών του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Πίνακας 3.2: Τιμές του συντελεστή τραχύτητας του εδάφους συγκριτικά με την κάλυψη γης (Πηγή: Καββαδά, 2012, ίδια επεξεργασία)

Κωδικός	Περιγραφή	Τιμή
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	115
112	Διεκεκομμένη αστική οικοδόμηση	115
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	115
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	115
123	Ζώνες λιμένων	115
124	Αεροδρόμια	115
131	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	115
133	Χώροι οικοδόμης	115
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	60
211	Μη αρδεύσιμη - αρόσιμη γη	50
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	50
221	Αμπελώνες	19
222	Οπωροφόρα δέντρα	19
223	Ελαιώνες	19
231	Λιβάδια	43
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	37
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστης	30
311	Δάσος πλατύφυλλων	15
312	Δάσος κωνοφόρων	15
321	Φυσικοί βοσκότοποι	37
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	30
324	Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	25
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	60
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	43
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	55
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	60
512	Συλλογές υδάτων	30
523	Θάλασσα	21

Επίσης, δημιουργείται ο κάναβος κλίσεων της περιοχής με τη χρήση του εργαλείου Slope του ArcMap, ώστε στη συνέχεια να προσεγγιστεί η ταχύτητα ροής. Η ταχύτητα ροής χωρίζεται σε ποτάμια (overchannel flow) και σε χερσαία (overland flow). Η τελευταία βασίζεται στη κλίση του εδάφους και στις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης. Αντίθετα, η πρώτη προκύπτει βάσει της χερσαίας ταχύτητας ροής, σε συνδυασμό με την ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου.

Η χερσαία ταχύτητα ροής εκτιμάται από τη παρακάτω σχέση (Μαμάσης, 2007):

$$V + \left(\frac{m}{s}\right) = k * \sqrt{S}\left(\frac{m}{m}\right) \quad (3.11)$$

Όπου:

k: συντελεστής τραχύτητας του εδάφους

S: κλίση του εδάφους

Οι υπολογισμοί λαμβάνουν χώρα στο περιβάλλον του ArcMap, με τη χρήση του εργαλείου Raster Calculator του ArcToolbox, μέσω του οποίου υλοποιούνται οι απαραίτητες μαθηματικές πράξεις, μεταξύ επιπέδων χωρικής πληροφορίας δομής raster και αριθμών. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας καθίσταται ο κάναβος της χερσαίας ροής. Στη συνέχεια παράγεται ο κάναβος κατεύθυνσης ροής, καθώς αποτελεί καθοριστικής σημασίας, για την υλοποίηση του κανάβου της ποτάμιας ροής. Αυτό γίνεται, μέσω της εντολής Flow Direction, για την απόδοση της κατεύθυνσης ροής για κάθε φατνίο, προς τα οκτώ γειτονικά του, με βάσει τη μέγιστη κλίση. Εν συνεχεία, λόγω του εργαλείου Flow Accumulation, παράγεται ο κάναβος της συγκέντρωσης της ροής. Εκεί, υπολογίζεται για κάθε φατνίο, το πλήθος αυτών, που απορρέουν σε αυτό. Έπειτα, επιλέγεται το κατώφλι, ως προς το πλήθος των κελιών, τα οποία απαιτείται να απορρέουν στο υπό εξέταση φατνίο, έτσι ώστε να θεωρηθεί ότι ανήκει στο υδρογραφικό δίκτυο. Τέλος, αφού προκύψει το υδρογραφικό, πραγματοποιείται ιεράρχηση των κλάδων σε τάξεις, βάσει μεθόδου Strahler και αυτό γίνεται στο λογισμικό ArcMap, μέσω του εργαλείου Stream Order.

Κάθε κλάδος ενός υδρογραφικού δικτύου, κατά Strahler, που δε δέχεται νερά άλλων μικρότερων υδατορεμάτων, καλείται κλάδος 1ης τάξης. Ύστερα, ο κλάδος 2ης τάξης συνίσταται προϊόν της συμβολής δύο κλάδων 1ης. Αντίστοιχα η συμβολή δύο τάξεων 2ης παράγει έναν κλάδο 3ης τάξης κ.ο.κ. Ωστόσο, ενδέχεται να συμβεί συμβολή δύο κλάδων ανόμοιας τάξης, μέσω της οποίας παράγεται νέος κλάδος, που διατηρεί τη μεγαλύτερη τάξη εκ των δύο αριθμητικά.

Έπειτα, γίνεται πολλαπλασιασμός του επιπέδου που δημιουργήθηκε προηγουμένως, με τον κάναβο χερσαίας ταχύτητας ροής και έτσι προκύπτει ο κάναβος ταχύτητας ροής του υδρογραφικού, μέσω του εργαλείου Raster Calculator. Με το ίδιο εργαλείο εξάγεται και ο κάναβος των αθροιστικών ταχυτήτων ροής (velocity), με απαραίτητες παραμέτρους την υδρογραφική και χερσαία ροή.

Επιπροσθέτως, με το εργαλείο Flow Length του ArcToolbox, υπολογίζεται το μήκος διαδρομής του κάθε φατνίου, μέχρι την έξοδο, με δεδομένο εισόδου την κατεύθυνση ροής, που έχει προηγηθεί. Όμως, χρειάζεται η μετατροπή της απόστασης αυτής, σε χρονικές μονάδες. Αυτό συμβαίνει με την εισαγωγή μιας νέας παραμέτρου, που υπολογίζεται ως το αντίστροφο της αθροιστικής ταχύτητας ροής. Έτσι, η χωρική απόσταση μετατρέπεται σε χρονική και κατά συνέπεια παράγονται οι ισόχρονες καμπύλες, μέσω των οποίων γίνεται η αποτύπωση του γεωμετρικού τόπου, ο οποίος αναφέρθηκε παραπάνω.

Τέλος, γίνεται ταξινόμηση σε κλάσεις και για την παρούσα μελέτη ανά μισάωρο. Για την παραγωγή του ΜΥΓ, η βροχόπτωση μοναδιαίου ύψους 10 mm πολλαπλασιάζεται με τις διαστάσεις του κάθε φατνίου, δηλαδή με την ακρίβειά του (5 m x 5 m) και ακολούθως με το πλήθος των φατνίων, που απορρέουν για την κάθε κλάση, άρα με το χρονικό βήμα.

Πρακτικά, η μέθοδος χωρίζεται σε τέσσερα στάδια. Σε πρώτη φάση, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του χρόνου που κάνουν τα pixel να φτάσουν στην έξοδο της λεκάνης, ενώ στη συνέχεια γίνεται ομαδοποίηση των αποτελεσμάτων με γνώμονα το χρονικό βήμα (Ισόχρονες Καμπύλες). Έπειτα, υφίσταται μετατροπή οι αριθοί των pixels, ανά χρονικό βήμα σε εμβαδό

λεκάνης απορροής και τέλος, μετατρέπεται η επιφάνεια σε παροχή, θεωρώντας βροχή 10 mm, μέσω του τύπου:

$$Q = P * A \tag{3.12}$$

Όπου:

P: ένταση της βροχής (mm/h)

A: εμβαδό λεκάνης (km^2)

Είναι προφανές, ότι για την εύρεση του χρόνου, απαιτείται η γνώση της απόστασης (L) και της ταχύτητας κίνησης (V). Ισχύει η σχέση:

$$t = \frac{L}{V} \tag{3.13}$$

Η απόσταση υπολογίζεται, μέσω του εργαλείου ArcMap, όπως και η ταχύτητα ροής, της οποίας η ανάλυση γίνεται σε επίπεδο Pixel, βάσει της ισοδιάστασης που έχει καθοριστεί. Η κλίση του εδάφους, καθώς και η τραχύτητά του, αποτελούν βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα. Οι ταχύτητες που υπολογίζονται είναι δύο: η ταχύτητα χερσαίας ροής και η ταχύτητα εντός υδρογραφικού δικτύου.

3.3.4 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder

Η χρήση της μεθόδου Snyder, λαμβάνει χώρα σε περιπτώσεις, όπου υπάρχει έλλειψη στοιχείων μιας λεκάνης. Τα μεγέθη που προσδιορίζονται αποτελούν η χρονική βάση, η παροχή αιχμής και τέσσερα σημεία του υδρογραφήματος, συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης (HEC-HMS, User's Manual, 4.8).

Σχέσεις και εξισώσεις που λαμβάνουν χώρα στην μέθοδο αυτή αποτελούν:

- ✓ Χρόνος υστέρησης:

$$tp = 0.75 * Ct * (Lca * L)^{0.3} \tag{3.14}$$

Όπου:

Ct: Αδιάστατος αριθμός που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (επιλέγεται η τιμή 1.85)

Lca: Η απόσταση από την έξοδο της περιοχής μελέτης ως το πλησιέστερο σημείο κατά μήκος του υδατορεύματος στο κέντρο βάρους της λεκάνης (km)

L: Η απόσταση του σταθμού μέτρησης παροχής ως τον υδροκρίτη, κατά μήκος του κύριο υδατορεύματος (km)

- ✓ Παροχή αιχμής:

$$Qp = Cp * 2.75 * A \div tp \tag{3.15}$$

Όπου:

Cp: Αδιάστατος συντελεστής, που εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης (επιλέγεται η τιμή 0.67)

A: Έκταση της λεκάνης απορροής (km^2)

- ✓ Χρονική βάση υδρογραφήματος:

$$T = 3 + 3 * tp \div 24 \quad (3.16)$$

Όπου T (days)

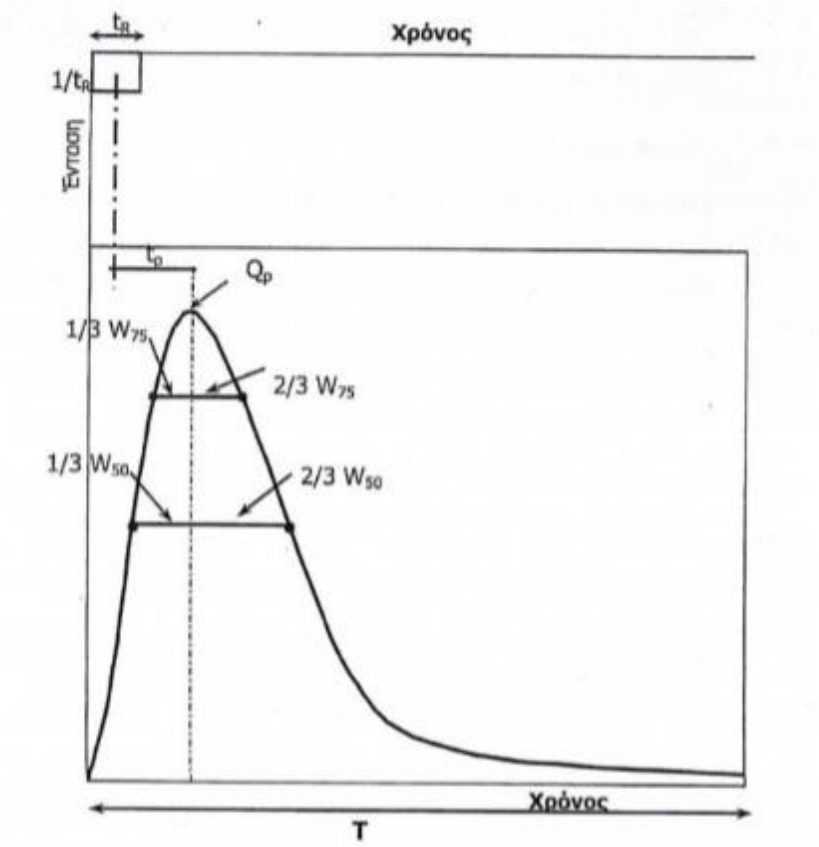
Επισημαίνεται ότι ο χρόνος υστέρησης υπολογίζεται από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης μέχρι την αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Η διάρκεια ενεργού βροχόπτωσης t_R, συνδέεται με τη χρονική υστέρηση t_p, από την παρακάτω εξίσωση:

$$tR = \frac{tp}{5.5} \quad (3.17)$$

Αν το ζητούμενο μοναδιαίο υδρογράφημα έχει διάρκεια t'_R μεγαλύτερη της t_R, τότε ο χρόνος υστέρησης διορθώνεται, μέσω της σχέσης:

$$t'p = tp + \frac{(t'R - tR)}{4} \quad (3.18)$$

Το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder παρατίθεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder (Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018)

Τα πλάτη του μοναδιαίου υδρογραφήματος στο 50% και στο 75% της αιχμής, W_{50} και W_{75} αντίστοιχα, δίνονται από τις σχέσεις:

$$W50 = \frac{830}{qp^{1.1}} \quad (3.19)$$

$$W75 = \frac{470}{qp^{1.1}} \quad (3.20)$$

Όπου:

q_p: η παροχή αιχμής ανοιγμένη στην επιφάνεια της λεκάνης Α

Επισημαίνεται πως στην συγκεκριμένη μέθοδο, οι τιμές του χρόνου υστέρησης t_p και του συντελεστή C_p προκύπτουν 12.06 h και 0.67 αντίστοιχα.

3.3.5 Μέθοδος αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος SCS

3.3.5.1 Μέθοδος SCS (transform method)

Το αδιάστατο υδρογράφημα της SCS είναι ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα, στο οποίο η παροχή εκφράζεται ως ο λόγος της παροχής προς την παροχή αιχμής Qp και ο χρόνος ως ο λόγος του χρόνου προς το χρόνο ανόδου του μοναδιαίου υδρογραφήματος Tp. Με δεδομένα την παροχή αιχμής και τη χρονική επιβράδυνση για συγκεκριμένη διάρκεια ενεργού βροχόπτωσης, το μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να εκτιμηθεί από το συνθετικό αδιάστατο υδρογράφημα για μια δεδομένη λεκάνη (HEC-HMS, User's Manual, 4.8).

Οι απαιτούμενοι χρόνοι για να κατασκευαστεί το μοναδιαίο υδρογράφημα, είναι (Κουτσογιάννης, 2011):

- ✓ Χρόνος συρροής: Ο χρόνος συγκέντρωσης είναι ίσος με τη διάρκεια που χρειάζεται για να φτάσει μια σταγόνα βροχής από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης στην υπό έλεγχο θέση (μέθοδος Giandotti (1934)
- ✓ Χρόνος ανόδου: Ο χρόνος που περνάει από την αρχή του πλημμυρικού επεισοδίου μέχρι την στιγμή έλευσης της πλημμυρικής αιχμής
- ✓ Χρόνος καθόδου: Ο χρόνος από την στιγμή που έρχεται η πλημμυρική αιχμή έως και το τέλος του επεισοδίου
- ✓ Χρόνος υστέρησης: Η χρονική απόσταση του κέντρου βάρους του ενεργού υετογραφήματος από την αιχμή του πλημμυρογραφήματος (κορυφή του τριγώνου)
- ✓ Διάρκεια βάσης: Ο συνολικός χρόνος του πλημμυρικού επεισοδίου

Αρχικά, υπολογίζεται ο χρόνος συρροής με τη μέθοδο Giandotti:

- ✓ Giandotti (1934):

$$t_c = \frac{4*\sqrt{A}+1.5*L}{0.8*\sqrt{\Delta z}} \quad (3.21)$$

Όπου:

t_c: χρόνος συρροής (h)
A: εμβαδόν λεκάνης απορροής (km^2)
L: μήκος κύριου υδατορέματος (km)
Δz: η υψομετρική διαφορά

Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο χρόνος υστέρησης:

$$t_L = 0.6 * t_\sigma \tag{3.22}$$

Όπου:

t_σ: χρόνος συρροής (h)

Έπειτα, υπολογίζεται ο χρόνο ανόδου (Κουτσογιάννης, 2011):

$$t_\alpha = \frac{D}{2} + t_L \tag{3.23}$$

Όπου:

D: διάρκεια βροχής (h)

t_L: χρόνος υστέρησης (h)

Τέλος, υπολογίζεται ο χρόνος βάσης:

$$t_b = 2.67 * t_\alpha \tag{3.24}$$

Όπου:

t_α: χρόνος ανόδου (h)

Έχοντας υπολογίσει τους παραπάνω χρόνους, μπορεί πλέον να υπολογιστεί η παροχή αιχμής του τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, με χρήση της εξίσωσης:

$$Q = \frac{0.75*A*h}{3600*t_p} \tag{3.25}$$

Όσον αφορά στις παραμέτρους που επιλέγονται, για τη μέθοδο SCS, επισημαίνεται ότι ο χρόνος συγκέντρωσης, προκύπτει από τους τύπους Giandotti και συγκεκριμένα, ισούται με 7.73 h.

3.3.5.2 Μέθοδος εκτίμησης απωλειών SCS Curve Number Loss Model

Σε αυτή τη μέθοδο, ο υπολογισμός πραγματοποιείται, από δεδομένη βροχή, με τη βοήθεια του ύψους βροχής, της αρχικής κατάστασης υγρασίας του εδάφους και των υδρολογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης. Βασικές παράμετροι αποτελούν η γεωμορφολογία, η λιθολογία και η βλάστηση, οι οποίες εκφράζονται με τον δείκτη CN που καλείται αριθμός καμπύλης απορροής. Ο δείκτης αυτός προσδιορίζεται, βάσει πινάκων, ως συνάρτηση των συνθηκών

εδαφικής υγρασίας, της υδρολογικής ομάδας εδάφους κα των χρήσεων γης, με εύρος τιμών 0<CN<100 (HEC-HMS, User's Manual, 4.8).

Πρακτικά, ο μετασχηματισμός της βροχόπτωσης σχεδιασμού σε πλημμυρική απορροή γίνεται με αφαίρεση των υδρολογικών απωλειών, δηλαδή τμήματος της βροχής που κατακρατείται στο έδαφος, το οποίο στη συνέχεια εξατμίζεται ή διηθείται. Μπορεί να προσδιοριστεί το τμήμα της ολικής βροχόπτωσης που μετατρέπεται σε απορροή, γνωστό ως ενεργός βροχόπτωση ή πλεόνασμα βροχόπτωσης.

Επιπλέον, η επιλογή του κατάλληλου αριθμού CN, κρίνεται σημαντικά από διάφορες παραμέτρους. Αρχικά, ο πρώτος παράγοντας αποτελεί η διαπερατότητα του εδάφους. Όσο μεγαλύτερη περατότητα έχει το έδαφος, τόσο μεγαλύτερες είναι οι διαφυγές, άρα και μικρότερο το δυναμικό απορροής. Έπειτα, σημαντικό ρόλο έχουν οι χρήσεις γης. Ο αριθμός CN, ποικίλει συναρτήσει των παραπάνω. Τέλος, ιδιαίτερης προσοχής χρήζουν οι υδρολογικές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, είναι προφανές πως τον χειμώνα είναι υγρό το έδαφος, ενώ αντίθετα το καλοκαίρι ξηρό. Άρα σε περίπτωση ενός επεισοδίου, στην ίδια περιοχή, θα διαφέρει τη χειμερινή, με τη θερινή περίοδο.

Πιο συγκεκριμένα, η παράμετρος S, η οποία αφορά τη δυνητικά μέγιστη κατακράτηση, αποτελεί βασική και ο τύπος της είναι (Κουτσογιάννης, 2011):

$$S = 254 * \left(\frac{100}{CN} - 1\right) \tag{3.26}$$

Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0-100 και εξαρτάται από:

- Διαπερατότητα εδάφους
- Χρήσεις γης
- Προηγούμενες εδαφικές συνθήκες (Υδρολογικές συνθήκες)

Πίνακας 3.3: Τύποι εδαφών (Μαμάσης, 2014)

A	Μεγάλοι ρυθμοί διήθησης (π.χ. αμμώδη και χαλικώδη)
B	Μέσοι ρυθμοί διήθησης (π.χ. αμμώδης πηλός)
C	Μικροί ρυθμοί διήθησης (π.χ. αργιλοπηλός)
D	Πολύ μικροί ρυθμοί διήθησης (π.χ. πλαστικές άργιλοι)

Πίνακας 3.4: Τύποι προηγούμενων συνθηκών εδαφικής υγρασίας (Μαμάσης, 2014)

I	Ξηρές συνθήκες (βροχή <13 mm ή <35 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης)
II	Μέσες συνθήκες (βροχή μεταξύ 13 mm και 38 mm ή μεταξύ 35 mm και 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης)
III	Υγρές συνθήκες (βροχή >38 mm ή >53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης)

3.3.6 Μέθοδος Unit Specified Hydrograph (transform method)

Μέσω της USH μεθόδου, δίνεται η δυνατότητα για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ της απορροής και της βροχόπτωσης. Πιο αναλυτικά η μέθοδος αυτή είναι σύνθετη. Συνεπώς, πρέπει να καθοριστεί ένα ΜΥΓ για την υπολεκάνη. Ιδανικά, τα ΜΥΓ αναπτύσσονται, μέσω παρατηρήσεων πολλαπλών καταιγίδων, σε περίπτωση μέτρησης της βροχόπτωσης και της ροής, για όμοια χρονικά διαστήματα (HEC-HMS, User's Manual, 4.8). Στη συγκεκριμένη εργασία, το ΜΥΓ που χρησιμοποιείται, προκύπτει από τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών.

Βασικά στοιχεία της USH μεθόδου αποτελούν:

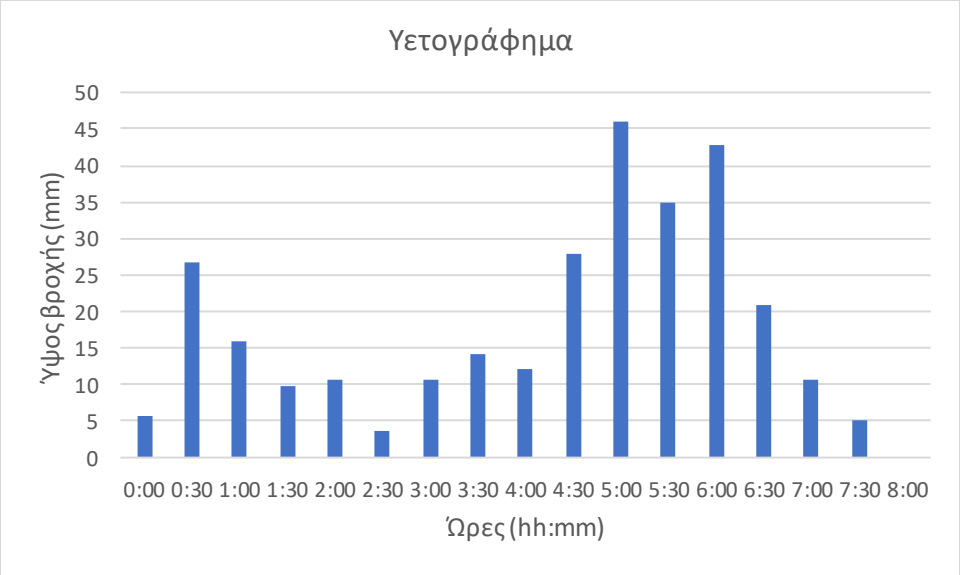
- ✓ Χρόνος διάρκειας:
  Ισούται με τη διάρκεια της κατακρήμνησης.

- ✓ Χρονικό διάστημα:
  Ισούται με το διάστημα των τεταγμένων του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

3.3.7 Υπολογισμός πλημμυρογραφήματος σε περιβάλλον HEC-HMS

Το HEC-HMS, αποτελεί μία υπολογιστική πλατφόρμα, μέσω της οποίας επιτρέπεται η επιλογή διαφορετικών μοντέλων, για τον υπολογισμό των συνιστωσών της υδρολογικής ανάλυσης. Ειναι κατάλληλο για προσομοίωση μεμονωμένου υδρολογικού συμβάντος, ή και για συνεχή προσομοίωση. Εφαρμόζεται είτε σε μεγάλες αγροτικές λεκάνες, είτε σε μικρές ημιαστικές ή αστικές. Ακόμη, το γραφικό περιβάλλον του επιτρέπει την εύκολη εναλλαγή ανάμεσα σε διάφορα μέρη και εφαρμογές του προγράμματος. Τέλος, το πρόγραμμα καθίσταται πολύ εύχρηστο και αποτελεσματικό, καθώς δίνεται η δυνατότητα για εξέταση διάφορων σεναρίων και της άμεσης συγκριτικής αξιολόγησής τους.

Ένα από τα βασικά δεδομένα εισόδου, καθίσταται το υετογράφημα. Πρακτικά, προστίθεται η δεδομένη βροχή, δηλαδή το ύψος βροχόπτωσης που έπεσε στην υπό εξέταση περιοχή. Εν προκειμένω, το υετογράφημα δόθηκε ανά δεκάλεπτα. Ωστόσο, για το λόγο ότι το ΜΥΓ που προέκυψε από τη μέθοδο των ισόχρονων ήταν ανά μισάωρο, έλαβε χώρα η μετατροπή του υετογραφήματος και τελικά δίνεται ανά μισάωρο (Σχήμα 3.11) (ΕΜΥ, 2021). Το συνολικό ύψος βροχής αγγίζει τα 294 mm, καθώς η διάρκεια βροχόπτωσης καθίσταται σχεδόν 8 ώρες.



Σχήμα 3.11: Υετογράφημα πλημμυρικού επεισοδίου 8 Αυγούστου 2020 (Πηγή: ΕΜΥ, 2021)

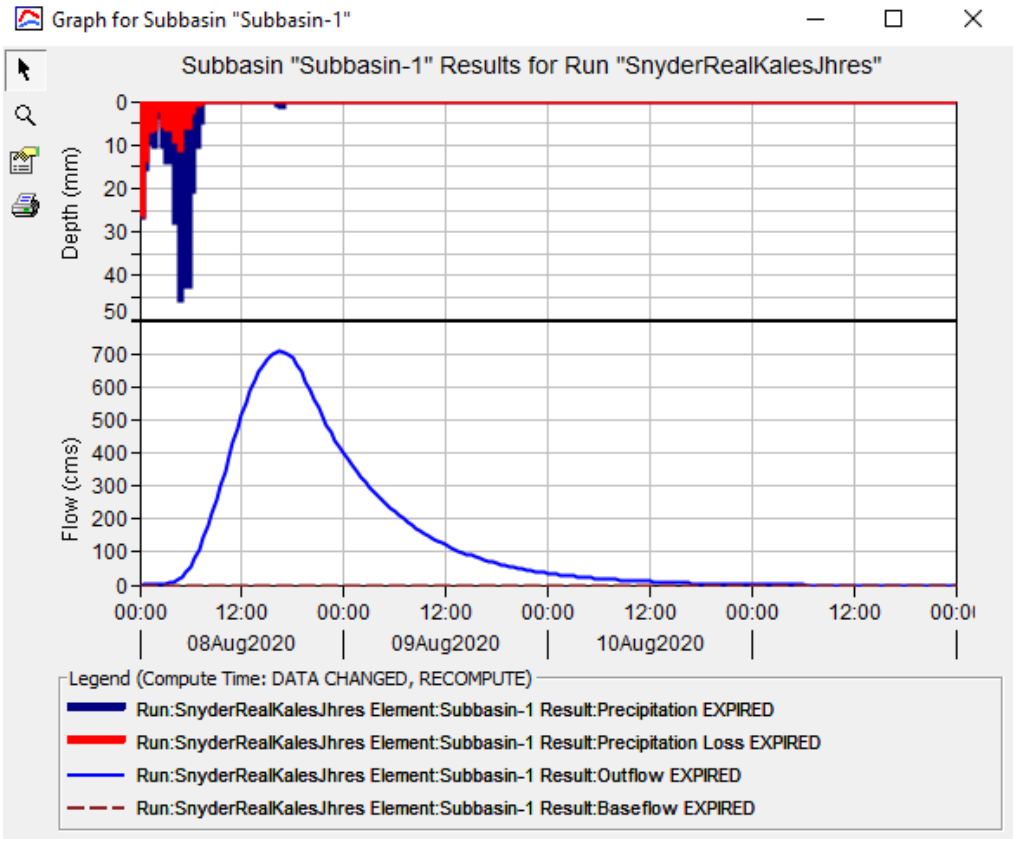
Εν συνεχεία, παρατίθενται τα βήματα, που πραγματοποιούνται στο περιβάλλον του προγράμματος HEC-HMS (HEC-HMS, User's Manual, 4.8):

- Μοντέλο Λεκάνης Απορροής
  Το πρώτο στάδιο αποτελεί η δημιουργία του μοντέλου λεκάνης απορροής.
- Εισαγωγή Δεδομένων
  Έπειτα, εισέρχονται τα βροχομετρικά δεδομένα.
- Μετεωρολογικό Μοντέλο
  Επιλέγονται οι τιμές βροχογράφων με βάρη.
- Αρχείο Επεισοδίων βροχής
  Δημιουργείται επεισόδιο βροχής, με ρεαλιστικά δεδομένα (Ημερομηνία, ώρα και ύψος βροχής).Γίνεται εισαγωγή των χρονικών δεδομένων του συγκεκριμένου φαινομένου, καθώς επίσης και το χρονικό βήμα.
- Εκτέλεση Υπολογισμών
  Επόμενο στάδιο του προγράμματος, όπου γίνεται η διεξαγωγή της προσομοίωσης, από την οποία προκύπτουν και τα, προς σύγκριση, αποτελέσματα.
- Αποτελέσματα
  Τελευταίο στάδιο, στο οποίο γίνεται επισκόπηση των αποτελεσμάτων και εν συνεχεία η σύγκριση αυτών. Τα στοιχεία που προκύπτουν εν τέλει είναι ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα βασικότερα στοιχεία και τιμές αυτών, καθώς και το πλημμυρογράφημα, το οποίο αποτελεί μία απο τις βασικές παραμέτρους του επόμενου υπολογιστικού προγράμματος, HEC-RAS.

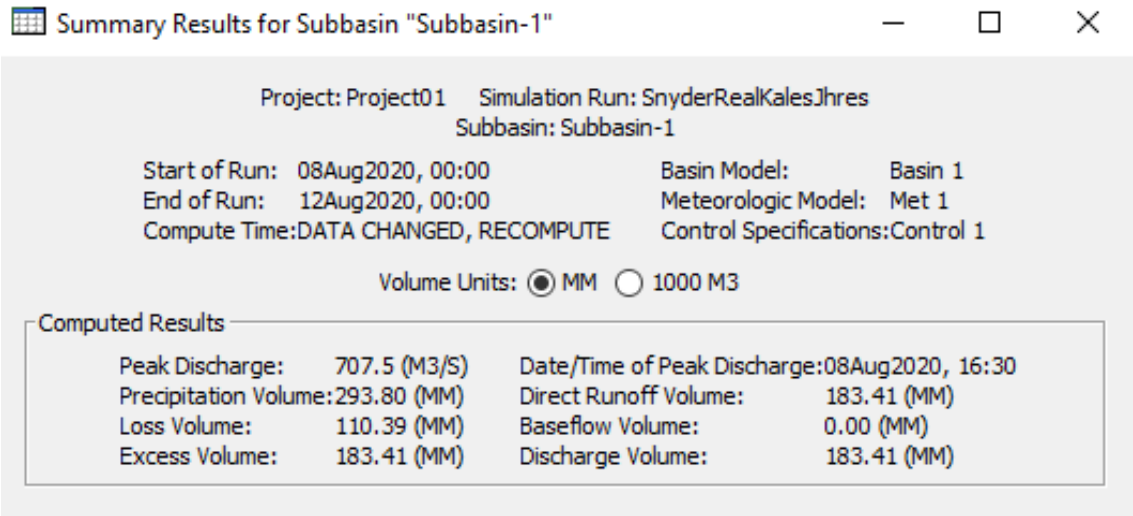
Σε πρώτο στάδιο αναλύεται η μέθοδος που επιλέγεται για τον υπολογισμό των απωλειών, ή οποία είναι η SCS CN.

Από την άλλη, οι μέθοδοι για τη μετατροπή βροχής σε απορροή, μέσω των οποίων θα προκύψουν τα προς σύγκριση αποτελέσματα είναι οι εξής: USH, Snyder και SCS.

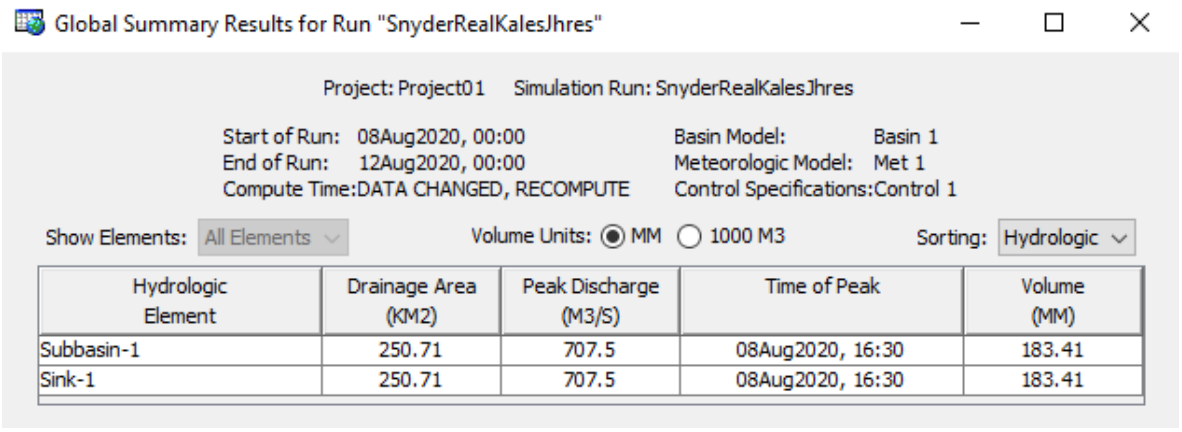
Παρατίθενται παρακάτω στο Σχήμα 3.12, στο Σχήμα 3.13 και στο Σχήμα 3.14, τα αποτελέσματα της μεθόδου Snyder και για διαφορετικές συνθήκες προηγούμενης κατάστασης υγρασίας εδάφους. Όμοια προκύπτουν για όλες τις άλλες μεθόδους και για υγρές και κανονικές συνθήκες υγρασίας. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα που εμφανίζονται, αποτελούν στην πρώτη εικόνα πλημμυρογράφημα διαγραμματικά, σε συνδυασμό μάλιστα με την αιχμή και την ώρα που συνέβη και στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένας συνοπτικός πίνακας, στον οποίο αναγράφονται η ακριβής τιμή της παροχής αιχμής, ο όγκος των κατακρημνίσεων κ.α.



Σχήμα 3.12: Εξαγωγή πλημμυρογραφήματος σε περιβάλλον HEC-HMS(Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 3.13: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων σε περιβάλλον HEC-HMS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 3.14: Συνοπτικός πίνακας αποτελεσμάτων σε περιβάλλον HEC-HMS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

3.4 Υδραυλική Προσομοίωση

3.4.1 Εισαγωγή δεδομένων

Μέσω της υδραυλικής προσομοίωσης, η οποία λαμβάνει χώρα στο λογισμικό HEC-RAS 2D, γίνεται προσδιορισμός της έκτασης της πλημμύρας καθώς και των μέγιστων βαθών και μέγιστων ταχυτήτων ροής για την εκάστοτε περιοχή σχεδιασμού. Το συγκεκριμένο λογισμικό συνίσταται ελεύθερης πρόσβασης και προέρχεται από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικάνικου Στρατού (USACE). Χρήση αυτού καθίσταται η υδραυλική ανάλυση υδάτων για συνθήκες μόνιμες και μη. Τα απαιτούμενα δεδομένα για την υλοποίηση της υδραυλικής προσομοίωσης, αποτελούν τα διανυσματικά αρχεία των ορίων της λεκάνης απορροής και της υπολεκάνης του υδρογραφικού δικτύου και των στοιχείων της χρήσης γης κατά Corine (2018). Όσον αφορά στις χρήσεις γης, επισημαίνεται ότι χρειάζονται οι τιμές του συντελεστή Manning, για τον εκάστοτε κωδικό

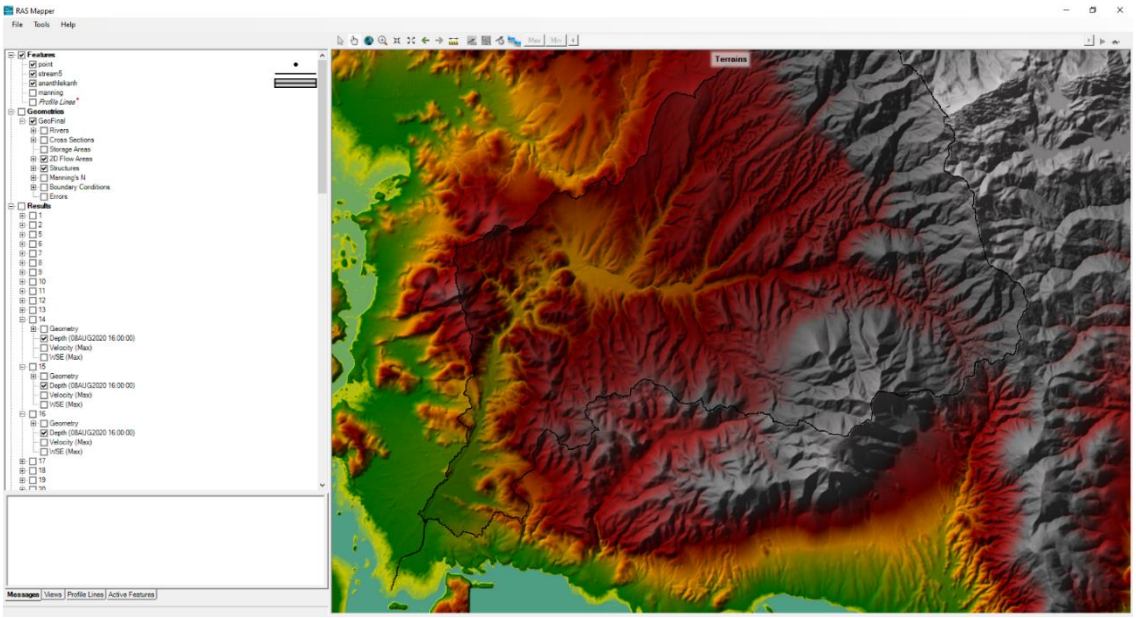
χρήσης γης. Για την παρούσα μελέτη, λαμβάνονται υπόψιν οι τιμές σύμφωνα με τον Huang (2005) και παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.5. Τέλος, γίνεται αξιοποίηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το λογισμικό HEC-HMS. Πιο συγκεκριμένα, για τις μεθόδους USH, Snyder, SCS, καθώς και για όλες τις υδρολογικές συνθήκες, δηλαδή υγρές, κανονικές και ξηρές. Επιπλέον, προστίθενται κάποιες απαραίτητες χρονικές παράμετροι, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια. Ύστερα από το πέρας των υδραυλικών υπολογισμών, εξάγονται τα αποτελέσματα στον Ras Mapper, καθώς δίνεται και η δυνατότητα δημιουργίας χαρτών για τα υπολογισμένα μεγέθη που προκύπτουν κατά την ανάλυση.

Πίνακας 3.5: Τιμές συντελεστή Manning για τις διαφορετικές χρήσεις γης κατά Corine (Δεδομένα από Huang, 2005, ίδια επεξεργασία)

Κωδικός	**Περιγραφή**	**Τιμή**
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	0.2
112	Διεκεκομμένη αστική οικοδόμηση	0.015
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0.2
122	Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα και γειτνιάζουσα γη	0.015
123	Ζώνες λιμένων	0.054
124	Αεροδρόμια	0.054
131	Χώροι εξόρυξης ορυκτών	0.12
133	Χώροι οικοδόμης	0.12
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.073
211	Μη αρδεύσιμη - αρόσιμη γη	0.035
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	0.035
221	Αμπελώνες	0.1
222	Οπωροφόρα δέντρα	0.15
223	Ελαιώνες	0.15
231	Λιβάδια	0.035
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0.05
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	0.12
311	Δάσος πλατύφυλλων	0.12
312	Δάσος κωνοφόρων	0.2
321	Φυσικοί βοσκότοποι	0.033
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	0.085
324	Μεταβατικές δασώδεις - θαμνώδεις εκτάσεις	0.085
331	Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0.045
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	0.05
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	0.045
334	Αποτεφρωμένες εκτάσεις	0.033
512	Συλλογές υδάτων	0.03
523	Θάλασσα	0.03

3.4.2 Υδραυλική προσομοίωση στη θέση ενδιαφέροντος

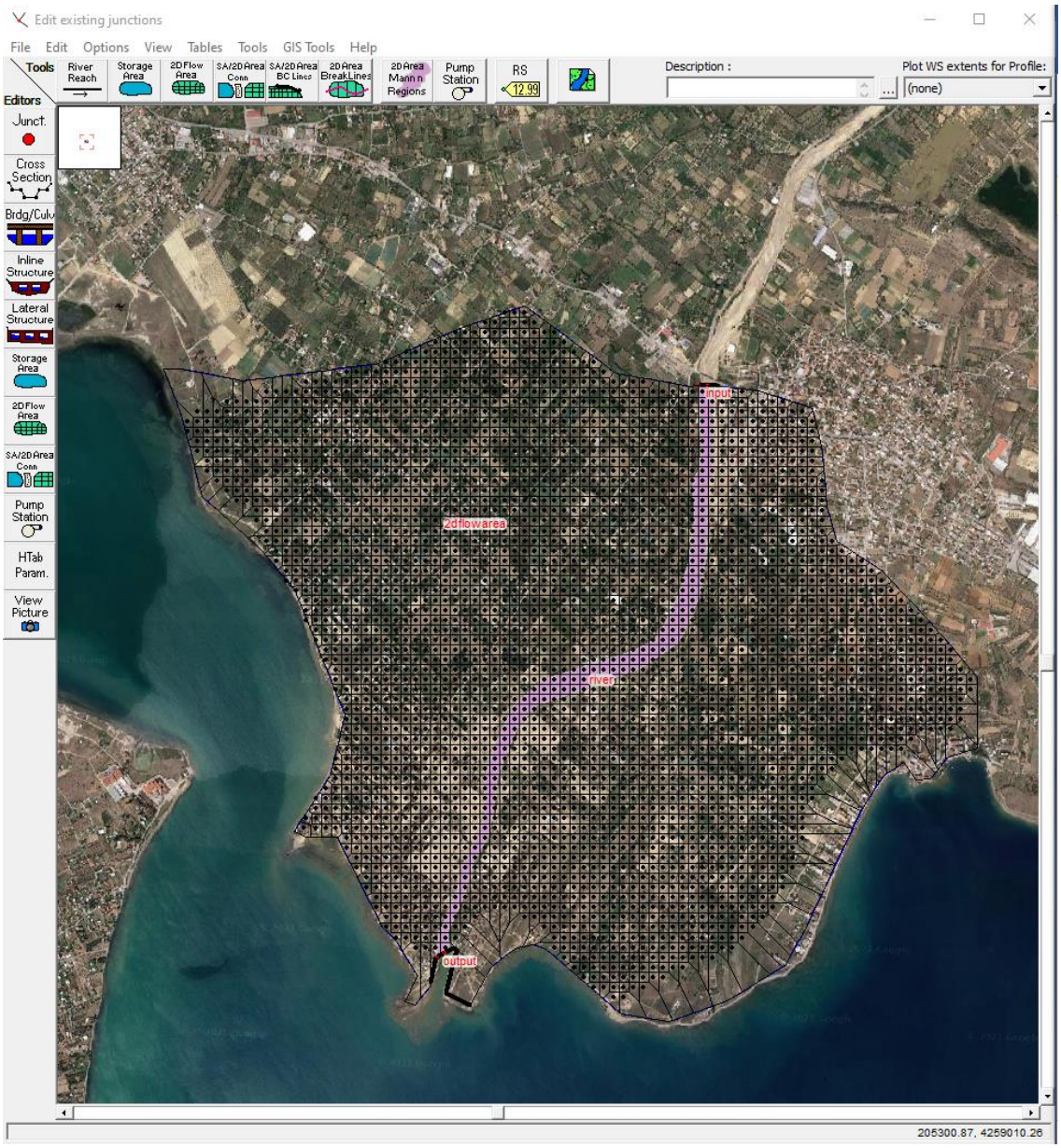
Σε πρώτο στάδιο, δημιουργείται ένα νέο Project στο λογισμικό HEC-RAS. Τα προαναφερθέντα δεδομένα εισούδου, προστίθενται στο περιβάλλον Ras Mapper. Τα δεδομένα αυτά εν προκειμένω, αποτελούν αρχικά το DEM, καθώς επίσης και το σημείο ενδιαφέροντος, η ανάντη λεκάνη και τέλος το κατάντη τμήμα του ποταμού Λήλαντα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Λεκάνη απορροής στο περιβάλλον Ras Mapper του HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

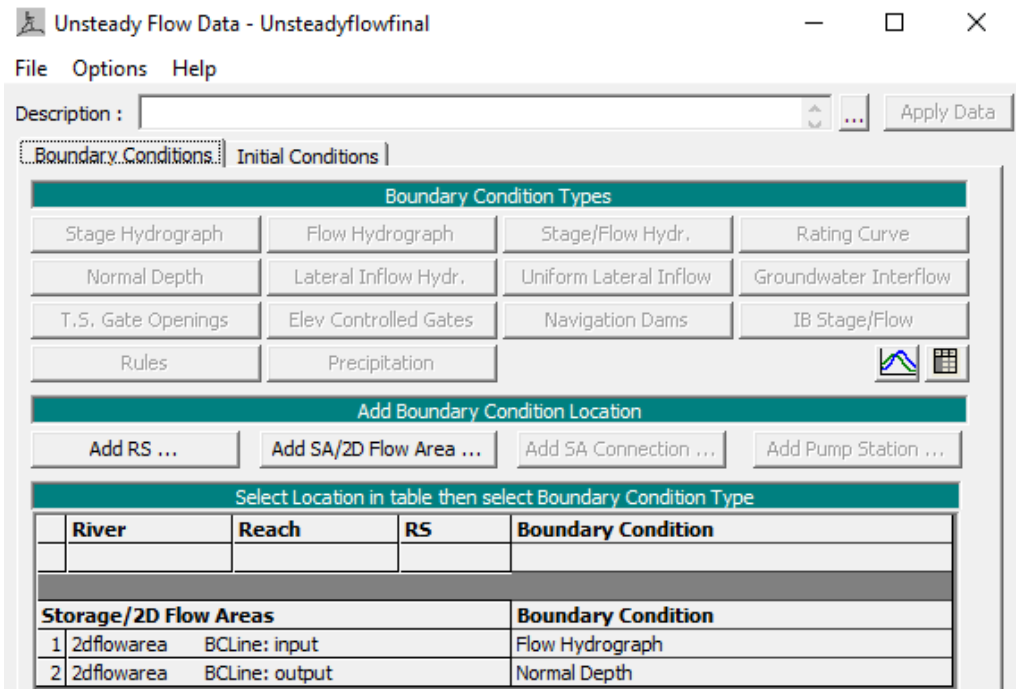
Έπειτα, γίνεται επεξεργασία του μοντέλου σε γεωμετρικό επίπεδο, μέσω του Geometric Data Editor και σε αντίθεση με το λογισμικό HEC-HMS, όπου οι υδρολογικές διεργασίες γίνονται ανάντη του σημείου προσομοίωσης, εν προκειμένω λαμβάνουν χώρα κατάντη του σημείου αυτού. Πρώτα, χρησιμοποιείται το εργαλείο 2D Flow Area, με σκοπό την παραγωγή ενός πλέγματος, μέσω της διαδικασίας της χάραξης. Στη συνέχεια, με τη χρήση του 2D Area Boundary Conditions Lines, επιλέγονται οι θέσεις, στις οποίες ισχύουν οι οριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, οι δύο αυτές θέσεις είναι ανάντη και κατάντη της περιοχής, όπου γίνεται η υδραυλική προσομοίωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Οι επιλογές των οριακών συνθηκών για συνθήκες μη μόνιμης ροής συνίστανται οι εξής:

- Υδρογράφημα στάθμης (Stage Hydrograph)
- Υδρογράφημα παροχής (Flow Hydrograph)
- Υδρογράφημα στάθμης – παροχής (Stage – Flow Hydrograph)
- Καμπύλη στάθμης – παροχής (Rating Curve)

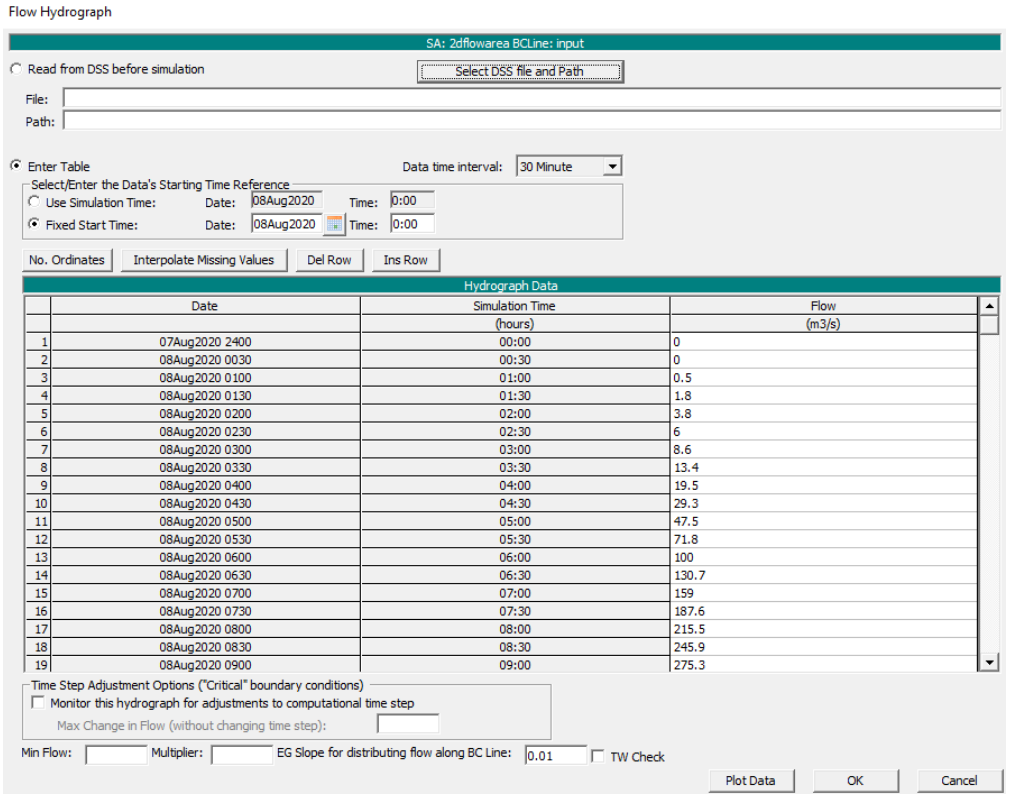


Σχήμα 3.16: Διεργασίες στο περιβάλλον Geometry Data Editor του HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

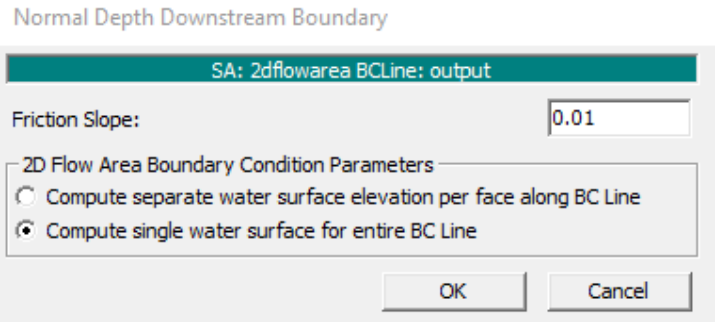
Για μη μόνιμη ροή, ως οριακή συνθήκη του ποταμού Λήλα καθίστανται, στο ανάντη τμήμα, το αντίστοιχο πλημμυρογράφημα, για την εκάστοτε περίσταση, το οποίο έχει υπολογιστεί, κατά την υδρολογική ανάλυση. Απαραίτητο είναι, η ταύτιση της ημερομηνίας και του χρόνου έναρξης της προσομοίωσης, με την ημερομηνία και τον χρόνο έναρξης του πλημμυρογραφήματος αντίστοιχα. Ακόμη, ορίζεται η κλίση της γραμμής ενέργειας ίση με 0.01. Αναφορικά με τις συνθήκες στο κατάντη τμήμα της περιοχής προσομοίωσης, επιλέγεται ως οριακή συνθήκη το ομοιόμορφο βάθος και ο ρυθμός απωλειών, λόγω τριβής, καθίσταται ίσος με 0.01. Τα παραπάνω, λαμβάνουν χώρα στο εργαλείο Unsteady Flow Data. Όλα τα προαναφερθέντα, αποτυπώνονται στο Σχήμα 3.17 και αναλυτικότερα στο Σχήμα 3.18 και στο Σχήμα 3.19.



Σχήμα 3.17: Οριακές συνθήκες στο περιβάλλον Unsteady Flow Data Editor του HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

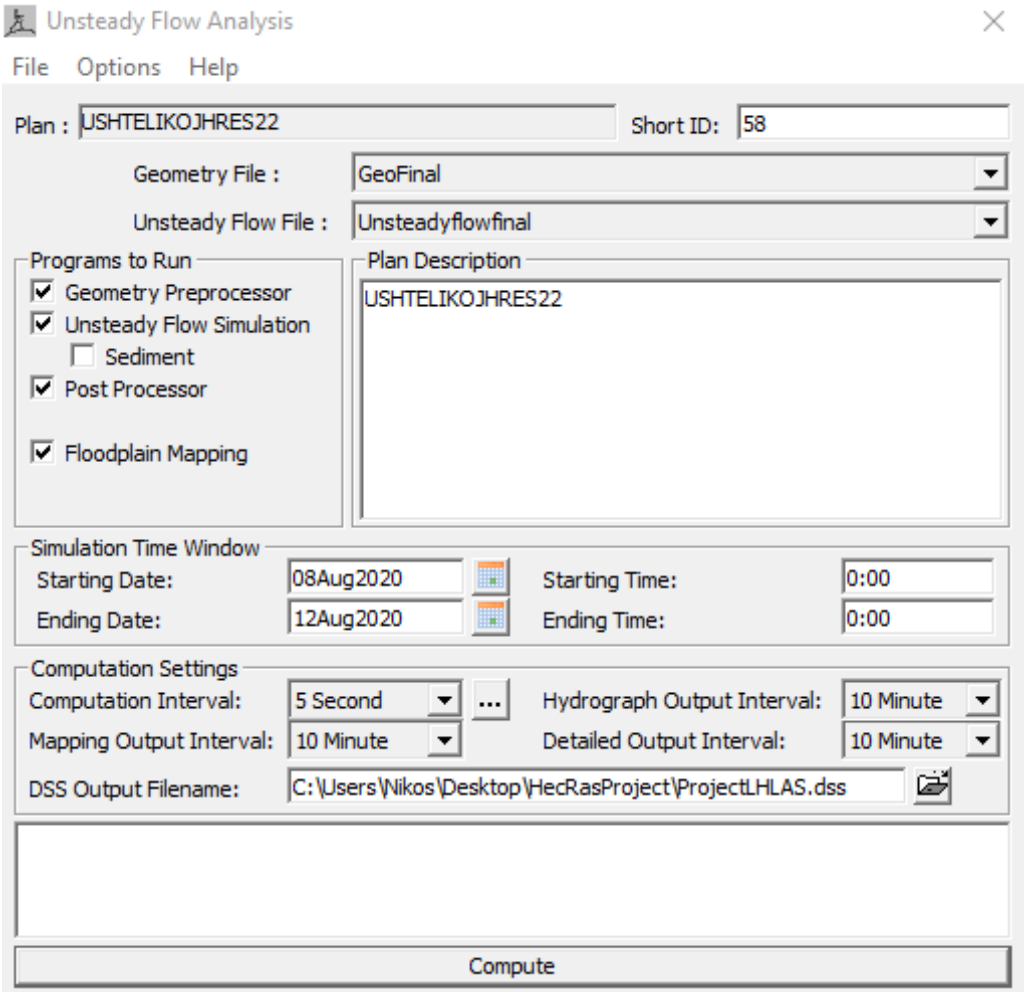


Σχήμα 3.18: Εισαγωγή πλημμυρογραφήματος ως ανάντη οριακή συνθήκη στο περιβάλλον Unsteady Flow Data Editor του HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 3.19: Εισαγωγή κατάντη οριακής συνθήκης στο περιβάλλον Unsteady Flow Data Editor του HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Τελευταίο στάδιο υφίσταται η έναρξη της διαδικασίας, για την παραγωγή των αποτελεσμάτων. Αυτό συμβαίνει με το εργαλείο Run Unsteady Flow Analysis. Αρχικά, δημιουργείται ένα νέο Plan, για την εκάστοτε περίπτωση. Ύστερα, ορίζονται το αρχείο της γεωμετρίας, καθώς και αυτό των οριακών συνθηκών της μη μόνιμης ροής. Επιπροσθέτως, επιλέγεται η εκτέλεση προεπεξεργασίας της γεωμετρίας (Geometry Preprocessor) για την επιτάχυνση των υπολογισμών της μη μόνιμης ροής, προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής (Unsteady Flow Simulation), μετεπεξεργασίας της μη μόνιμης ροής (Post Processor), για τον υπολογισμό λεπτομερών υδραυλικών πληροφοριών, αναφορικά με το ύψος ροής και τη ροή, για ένα σύνολο χρονικών διαστημάτων, κατά τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης της μη μόνιμης ροής, καθώς και απεικόνισης του πεδίου πλημμύρας σε ανάλογο χάρτη (Floodplain Mapping). Στη συνέχεια, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η επιλογή της ημερομηνίας και του χρόνου έναρξης του μοντέλου, το οποίο χρειάζεται να είναι σύμφωνο με αυτά του πλημμυρογραφήματος. Τέλος, ορίζεται το χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών ίσο με 5 sec, το χρονικό βήμα εξαγωγής χαρτογραφημένων αποτελεσμάτων ίσο με 10 min, καθώς και το χρονικό βήμα των εξαγόμενων υδρογραφημάτων και των λεπτομερών αποτελεσμάτων ίσο με 10 min αντιστοίχως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.20.

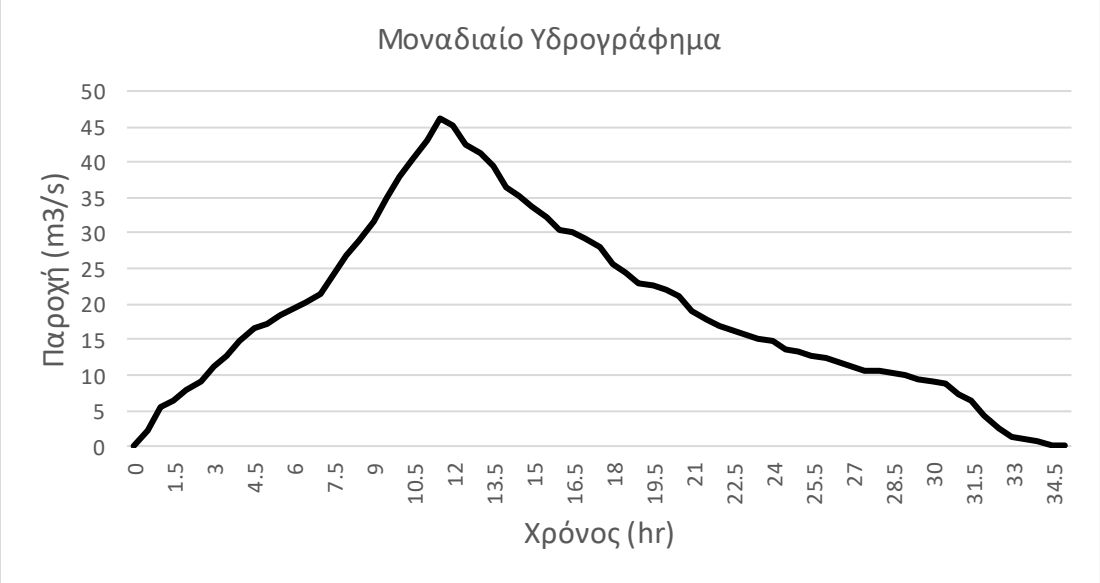


Σχήμα 3.20: Διεργασίες στο περιβάλλον Unsteady Flow Analysis Editor του HEC-RAS (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Αποτελέσματα Υδρολογικής Ανάλυσης

Πρώτα απ' όλα, κρίνεται απαιραίτητος ο υπολογισμός του ΜΥΓ την περιοχή μελέτης. Στην παρούσα εργασία, αυτό παράγεται, μέσω της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Παρατίθεται στο Σχήμα 4.1, το μοναδιαίο υδρογράφημα διαγραμματικά.

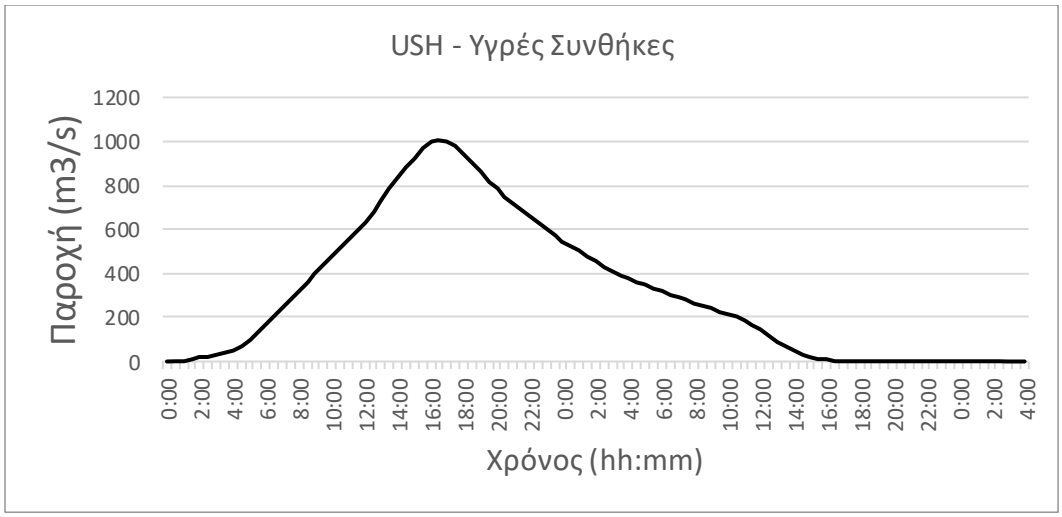


Σχήμα 4.1: Μοναδιαίο Υδρογράφημα της λεκάνης με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Χαρακτηριστικά του διαγράμματος αποτελούν το ότι η μέγιστη τιμή της παροχής (αιχμή), αγγίζει τα 46 m3/s, με αντίστοιχη ώρα αιχμής τις 11:30 h, μετά την έναρξη του επεισοδίου. Επίσης, ο χρόνος βάσης του ΜΥΓ, αποτελεί τις 34.5 h. Ύστερα από την παραγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος, σειρά έχει η παραγωγή των πλημμυρογραφημάτων για την υπό εξέταση περιοχή (252 km^2) μέσω των μεθόδων USH, Snyder και SCS και Unite Specified Hydrograph, όπως έχουν αναλυθεί προηγουμένως σε περιβάλλον HEC-HMS.

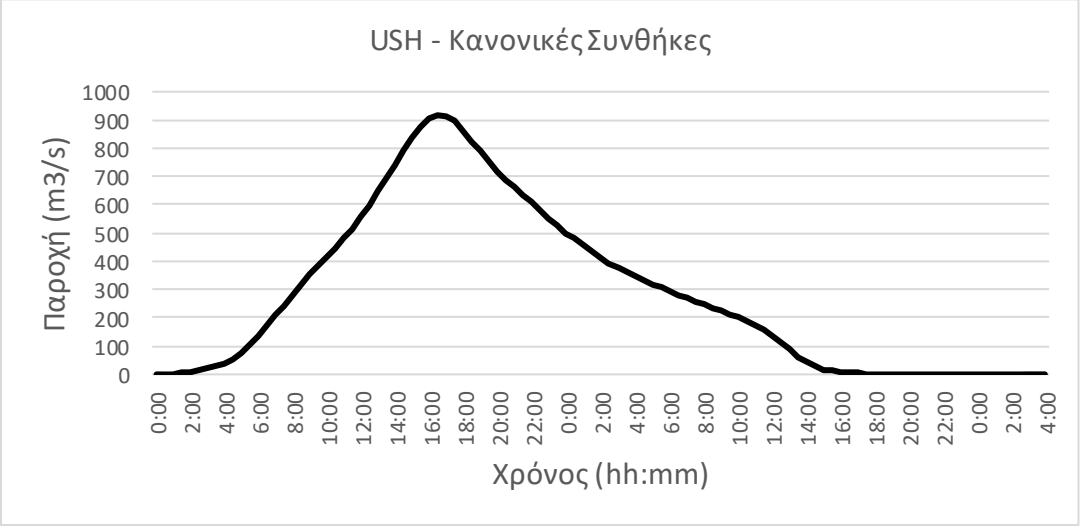
4.1.1 Μέθοδος United Specified Hydrograph (USH)

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα, από τη μέθοδο USH. Στα παρακάτω σχήματα, φαίνονται τα πλημμυρογραφήματα για όλες τις συνθήκες προηγούμενης εδαφικής υγρασίας, δηλαδή για υγρές, κανονικές και ξηρές. Για τις υγρές συνθήκες, παρατηρείται στο Σχήμα 4.2 ότι η παροχή αιχμής είναι 1005 m^3/s. Η ακριβής ώρα αιχμής, καθίσταται την ημέρα 8 Αυγούστου 2020 και ώρα 16:30.



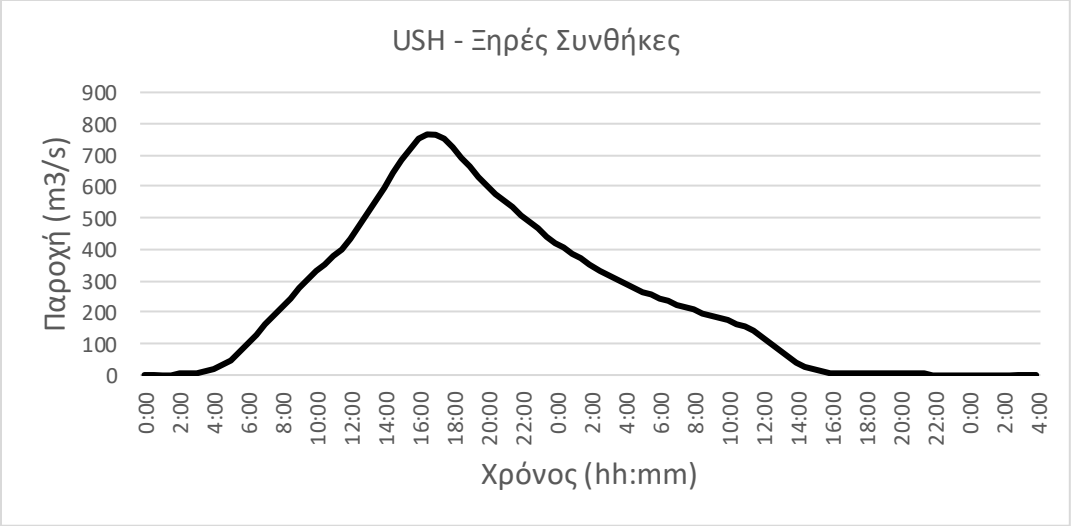
Σχήμα 4.2: Πλημμυρογράφημα με τη μέθοδο USH για υγρές συνθήκες στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Αντίστοιχα, για τις κανονικές συνθήκες, στο Σχήμα 4.3, παρατηρείται ότι η παροχή αιχμής αποτελεί 916.9 m^3/s και συμβαίνει στις 8 Αυγούστου 2020 και ώρα 16:30.



Σχήμα 4.3: Πλημμυρογράφημα με την μέθοδο USH για κανονικές συνθήκες στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Τέλος, για τις ξηρές συνθήκες στο Σχήμα 4.4, η μέγιστη παροχή είναι 765 m^3/s, η οποία λαμβάνει χώρα στις 8 Αυγούστου 2020 και ώρα 17:00.



Σχήμα 4.4: Πλημμυρογράφημα με τη μέθοδο USH για ξηρές συνθήκες στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Περισσότερα χαρακτηριστικά των πλημμυρογραφημάτων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.5.

Υγρές συνθήκες	
Παροχή αιχμής (m3/s)	1005.3
Ύψος βροχόπτωσης (mm)	293.8
Ύψος Απωλειών (mm)	47.69
Ύψος ενεργούς βροχόπτωσης (r	246.11
Ημέρα/Ώρα αιχμής	08Aug2020, 16:30
Ύψος άμεσης απορροής	237.24
Ύψος Βασικής ροής (mm)	0
Ύψος εκφόρτισης (mm)	237.24

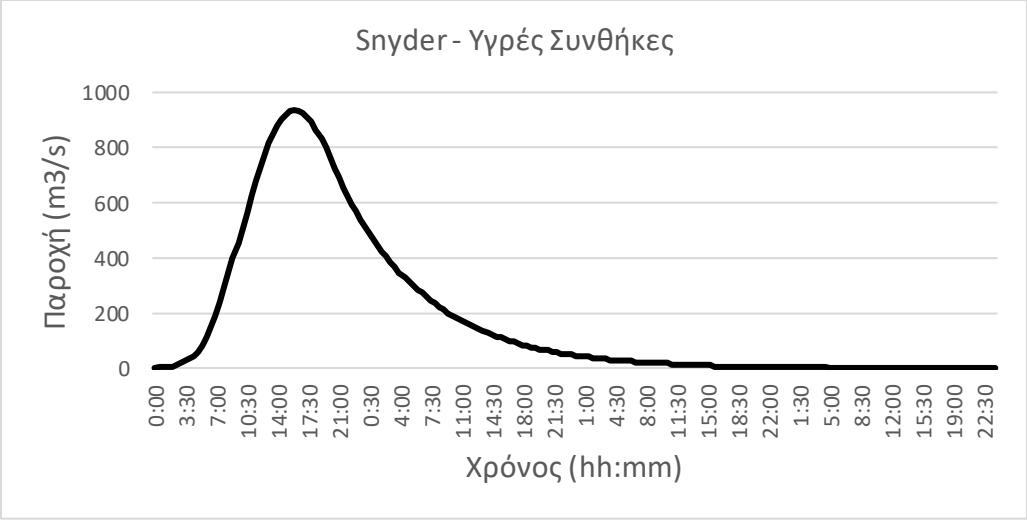
Κανονικές Συνθήκες	
Παροχή αιχμής (m3/s)	916.9
Ύψος βροχόπτωσης (mm)	293.8
Ύψος Απωλειών (mm)	71.35
Ύψος ενεργούς βροχόπτωσης (r	222.45
Ημέρα/Ώρα αιχμής	08Aug2020, 16:30
Ύψος άμεσης απορροής	214.43
Ύψος Βασικής ροής (mm)	0
Ύψος εκφόρτισης (mm)	214.43

Ξηρές συνθήκες	
Παροχή αιχμής (m3/s)	765.1
Ύψος βροχόπτωσης (mm)	293.8
Ύψος Απωλειών (mm)	110.39
Ύψος ενεργούς βροχόπτωσης (r	183.41
Ημέρα/Ώρα αιχμής	08Aug2020, 17:00
Ύψος άμεσης απορροής	176.8
Ύψος Βασικής ροής (mm)	0
Ύψος εκφόρτισης (mm)	176.8

Σχήμα 4.5: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των πλημμυρογραφημάτων με τη μέθοδο USH για όλες τις συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

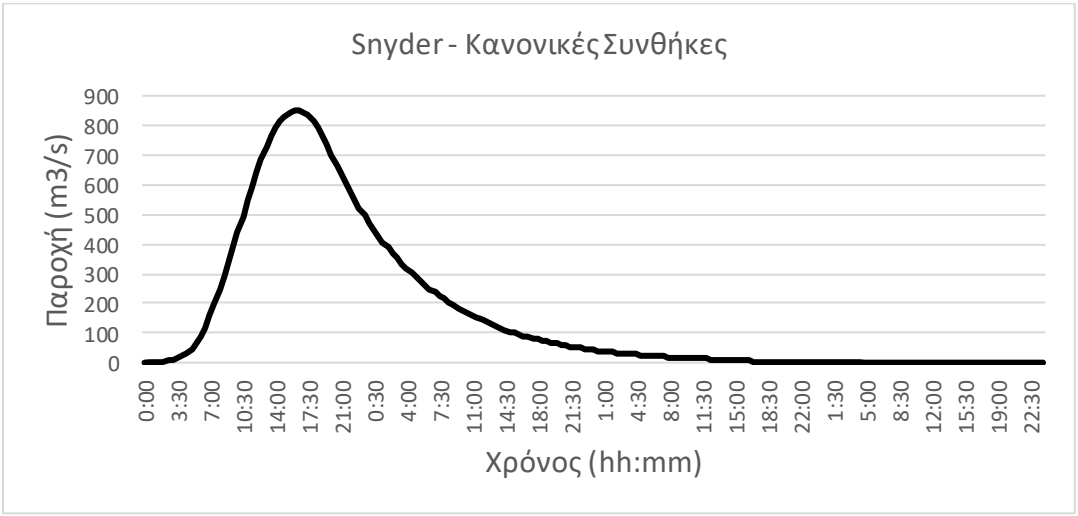
4.1.2 Μέθοδος Snyder

Σε αυτή την υποενότητα, φαίνονται τα αποτελέσματα, για τη μέθοδο Snyder. Στα παρακάτω σχήματα, παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα για όλες τις συνθήκες υγρασίας. Αναλυτικά, για υγρές, κανονικές και ξηρές. Πρώτα, για τις υγρές συνθήκες στο Σχήμα 4.6, η παροχή αιχμής είναι 936 m^3/s στις 16:00 την ημέρα 8 Αυγούστου 2020.



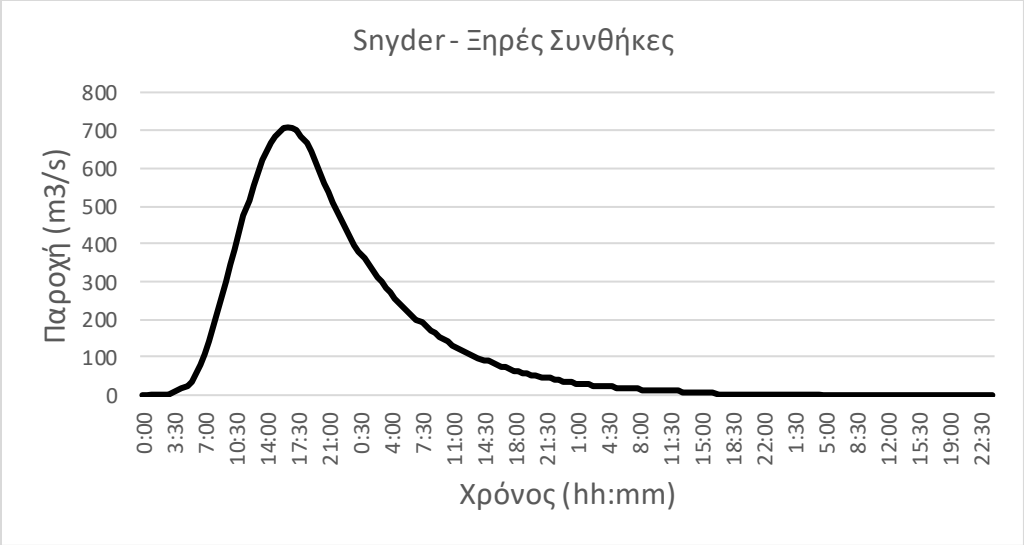
Σχήμα 4.6: Πλημμυρογράφημα με τη μέθοδο Snyder για υγρές συνθήκες στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Έπειτα στο Σχήμα 4.7 και για τις κανονικές συνθήκες, παρατηρείται στις 16:30 το μεσημέρι της 8ης Αυγούστου του 2020, παροχή αιχμής 851 m^3/s.



Σχήμα 4.7: Πλημμυρογράφημα με τη μέθοδο Snyder για κανονικές συνθήκες στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Τέλος στο Σχήμα 4.8, για τις ξηρές συνθήκες υγρασίας, η αιχμή φτάνει την τιμή 708 m^3/s την 8η Αυγούστου 2020 στις 16:30.



Σχήμα 4.8: Πλημμυρογράφημα με τη μέθοδο Snyder για ξηρές συνθήκες στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Αναλυτικότερα χαρακτηριστικά των πλημμυρογραφημάτων, παρατίθενται στο Σχήμα 4.9.

Υγρές συνθήκες	
Παροχή αιχμής (m3/s)	935.6
Ύψος βροχόπτωσης (mm)	293.8
Ύψος Απωλειών (mm)	47.69
Ύψος ενεργούς βροχόπτωσης (m	246.11
Ημέρα/Ώρα αιχμής	08Aug2020, 16:00
Ύψος άμεσης απορροής	246.11
Ύψος Βασικής ροής (mm)	0
Ύψος εκφόρτισης (mm)	246.11

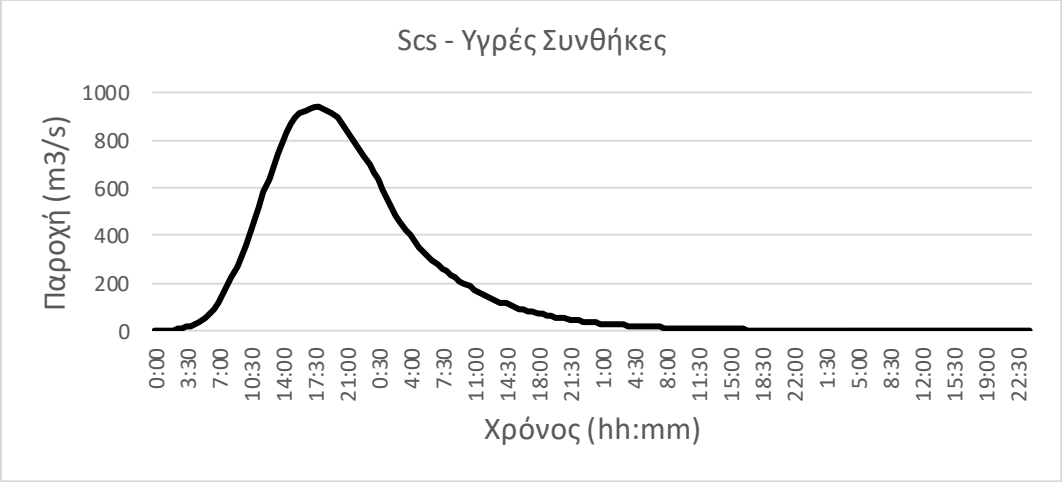
Κανονικές Συνθήκες	
Παροχή αιχμής (m3/s)	850.7
Ύψος βροχόπτωσης (mm)	293.8
Ύψος Απωλειών (mm)	71.35
Ύψος ενεργούς βροχόπτωσης (m	222.45
Ημέρα/Ώρα αιχμής	08Aug2020, 16:30
Ύψος άμεσης απορροής	222.45
Ύψος Βασικής ροής (mm)	0
Ύψος εκφόρτισης (mm)	222.45

Ξηρές συνθήκες	
Παροχή αιχμής (m3/s)	707.5
Ύψος βροχόπτωσης (mm)	293.8
Ύψος Απωλειών (mm)	110.39
Ύψος ενεργούς βροχόπτωσης (m	183.41
Ημέρα/Ώρα αιχμής	08Aug2020, 16:30
Ύψος άμεσης απορροής	183.41
Ύψος Βασικής ροής (mm)	0
Ύψος εκφόρτισης (mm)	183.41

Σχήμα 4.9: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των πλημμυρογραφημάτων με τη μέθοδο Snyder για όλες τις συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

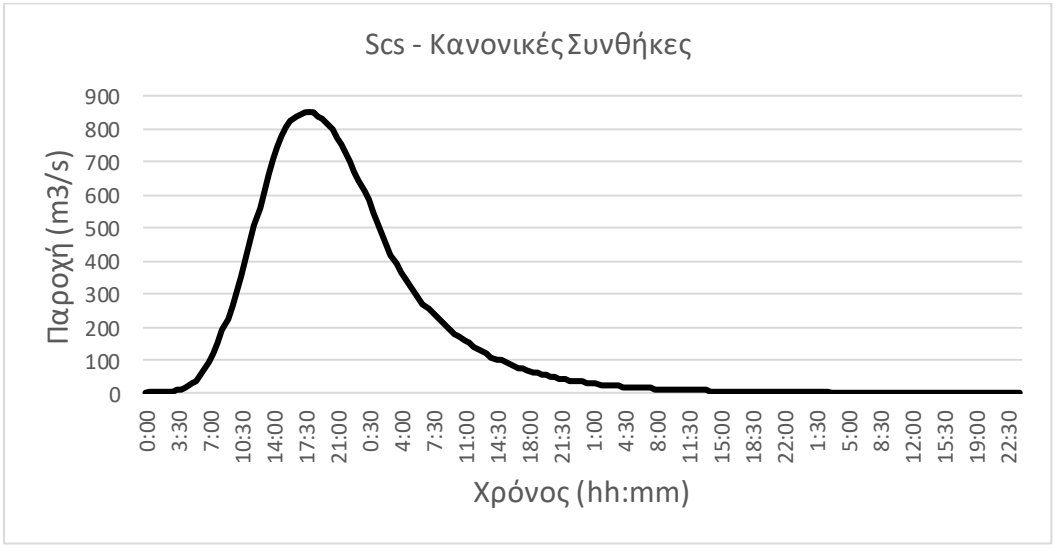
4.1.3 Μέθοδος SCS

Στο παρόν κεφάλαιο, παρατίθενται τα υδρολογικά αποτελέσματα της μεθόδου SCS, για όλες τις συνθήκες υγρασίας, όπως και προηγουμένως. Σε υγρές συνθήκες, παρατηρείται παροχή αιχμής 938 m^3/s, στις 17:30 την 8η Αυγούστου 2020, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10.



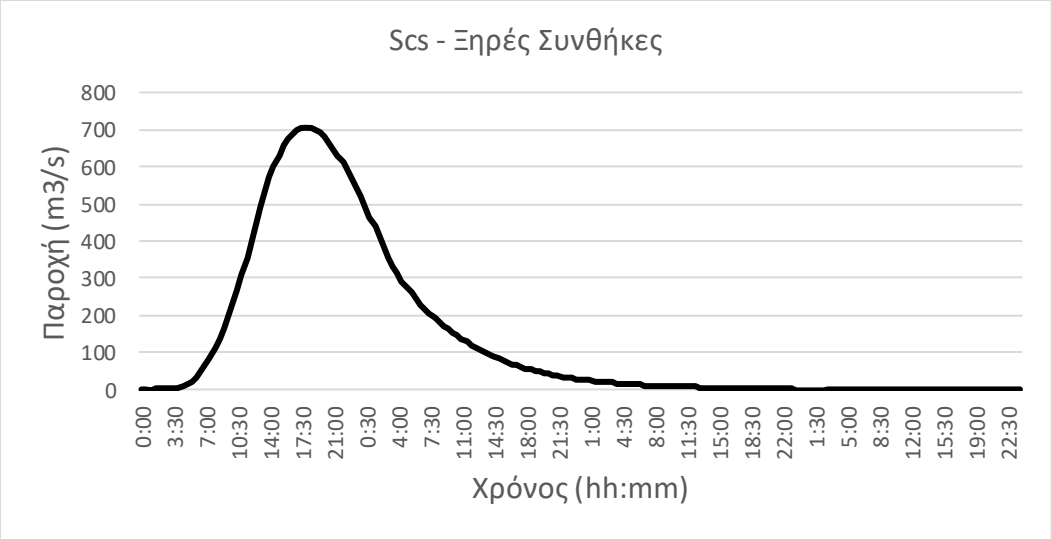
Σχήμα 4.10: Πλημμυρογράφημα με τη μέθοδο SCS για υγρές συνθήκες στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Αντίστοιχα στο Σχήμα 4.11, για κανονικές συνθήκες υγρασίας, η αιχμή είναι 851 m^3/s και αυτή λαμβάνει χώρα στις 18:00 την ημέρα 8 Αυγούστου 2020.



Σχήμα 4.11: Πλημμυρογράφημα με τη μέθοδο SCS για κανονικές συνθήκες στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Τέλος, σε ξηρό περιβάλλον, φαίνεται ότι στις 18:00, παρατηρείται η αιχμή με τιμή 705 m^3/s, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Πλημμυρογράφημα με τη μέθοδο SCS για ξηρές συνθήκες στο σημείο προσομοίωσης της λεκάνης (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Πιο πολλά στοιχεία για τη μέθοδο αυτή, παρατίθενται στο Σχήμα 4.13.

Υγρές συνθήκες	
Παροχή αιχμής (m3/s)	938.2
Ύψος βροχόπτωσης (mm)	293.8
Ύψος Απωλειών (mm)	47.69
Ύψος ενεργούς βροχόπτωσης (m	246.11
Ημέρα/Ώρα αιχμής	08Aug2020, 17:30
Ύψος άμεσης απορροής	246.11
Ύψος Βασικής ροής (mm)	0
Ύψος εκφόρτισης (mm)	246.11

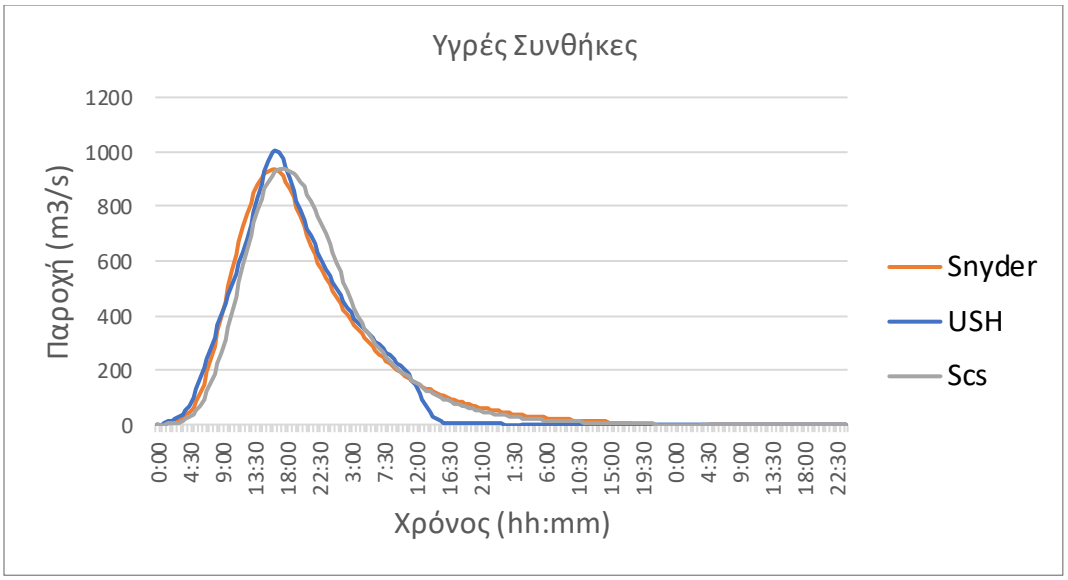
Κανονικές Συνθήκες	
Παροχή αιχμής (m3/s)	850.6
Ύψος βροχόπτωσης (mm)	293.8
Ύψος Απωλειών (mm)	71.35
Ύψος ενεργούς βροχόπτωσης (m	222.45
Ημέρα/Ώρα αιχμής	08Aug2020, 18:00
Ύψος άμεσης απορροής	222.45
Ύψος Βασικής ροής (mm)	0
Ύψος εκφόρτισης (mm)	222.45

Ξηρές συνθήκες	
Παροχή αιχμής (m3/s)	704.7
Ύψος βροχόπτωσης (mm)	293.8
Ύψος Απωλειών (mm)	110.39
Ύψος ενεργούς βροχόπτωσης (m	183.41
Ημέρα/Ώρα αιχμής	08Aug2020, 18:00
Ύψος άμεσης απορροής	183.41
Ύψος Βασικής ροής (mm)	0
Ύψος εκφόρτισης (mm)	183.41

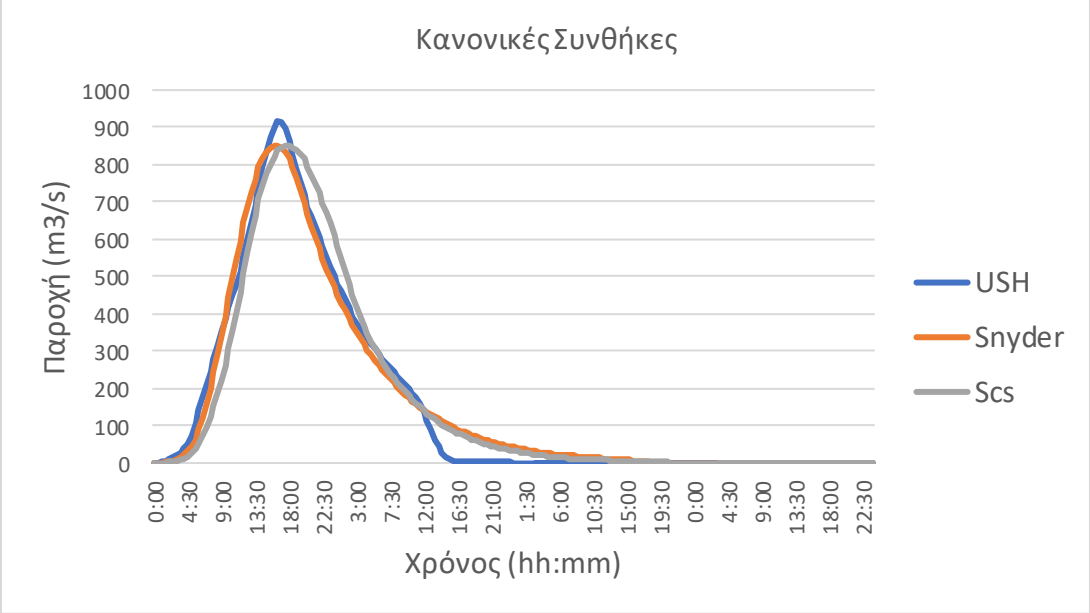
Σχήμα 4.13: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των πλημμυρογραφημάτων με τη μέθοδο SCS για όλες τις συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

4.1.4 Σύγκριση μεθόδων

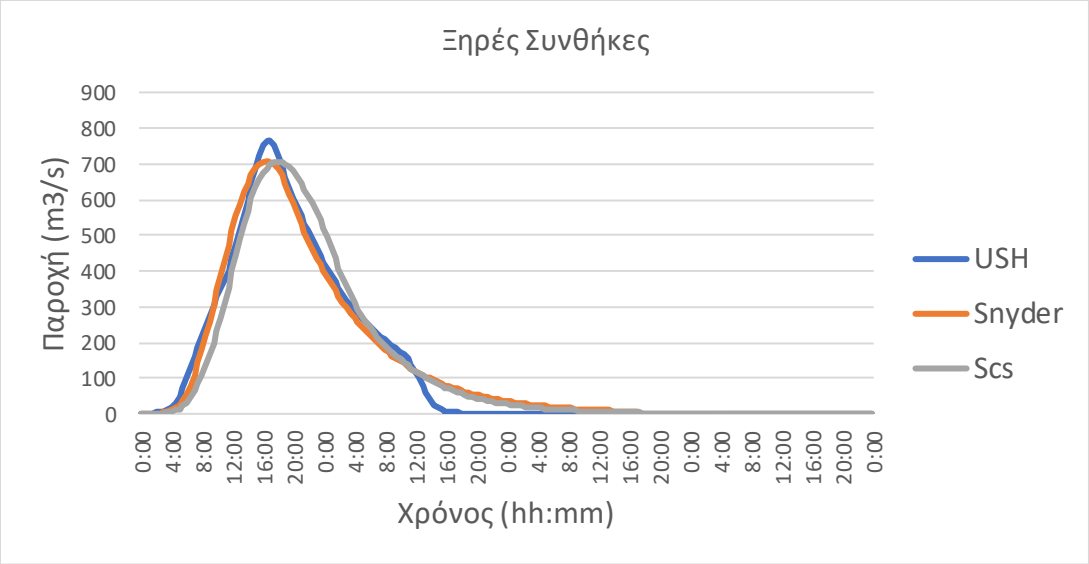
Θεωρείται απαραίτητη η σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραπάνω μεθόδων. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, γίνεται συμπύκνωση των αποτελεσμάτων, βάσει υδρολογικών συνθηκών. Δηλαδή, στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα για την εκάστοτε υδρολογική συνθήκη. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 4.14, φαίνονται τα αποτελέσματα για υγρό περιβάλλον, στο Σχήμα 4.15 για κανονικές συνθήκες, ενώ τέλος στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα σε ξηρό περιβάλλον.



Σχήμα 4.14: Πλημμυρογραφήματα με τις τρεις μεθόδους (USH, Snyder και SCS) στο σημείο προσομοίωσης της υπό μελέτη λεκάνης και για υγρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 4.15: Πλημμυρογραφήματα με τις τρεις μεθόδους (USH, Snyder και SCS) στο σημείο προσομοίωσης της υπό μελέτη λεκάνης και για κανονικές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 4.16: Πλημμυρογραφήματα με τις τρεις μεθόδους (USH, Snyder και SCS) στο σημείο προσομοίωσης της υπό μελέτη λεκάνης και για ξηρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Από τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι τα τρία μοντέλα, που εφαρμόζονται στην υπό μελέτη περιοχή, έχουν μικρή σχετικά απόκλιση. Επιπλέον, φαίνεται ότι η μέθοδος USH εμφανίζει την υψηλότερη παροχή αιχμής και σε μικρότερο χρόνο, συγκριτικά με τις άλλες δύο μεθόδους Snyder και SCS αντίστοιχα. Παράλληλα, μεταξύ των τελευταίων, δεν φαίνεται κάποια σημαντική απόκλιση, καθώς η διαφορά της τιμής της παροχής αιχμής είναι προσεγγιστικά ίδια, για την εκάστοτε συνθήκη υγρασίας. Τέλος, όσον αφορά την ώρα αιχμής τους, παρατηρείται ότι η μέθοδος Snyder προηγείται από την SCS, για όλες τις περιπτώσεις.

Από την υδρολογική ανάλυση προκύπτει ότι η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών παρόλο που είναι χρονοβόρα, συνίσταται εύχρηστη, καθώς ο χρήστης δύναται να επέμβει και να προσαρμόσει τις μεταβλητές της, για την βέλτιστη αποτύπωση του συνδυασμού βροχής και απορροής (Theochari et al., 2021).

4.2 Αποτελέσματα Υδραυλικής Ανάλυσης

Όπως έχει προαναφερθεί, η υδραυλική προσομοίωση έπεται της υδρολογικής ανάλυσης. Η υδρολογική ανάλυση λαμβάνει χώρα ανάντη του σημείου προσομοίωσης, με απώτερο σκοπό την παραγωγή του πλημμυρογραφήματος, το οποίο καθίσταται το βασικό δεδομένο εισόδου για την υδραυλική προσομοίωση, ως η ανάντη οριακή συνθήκη. Επίσης, η τελευταία συμβαίνει στην περιοχή κατάντη του σημείου προσομοίωσης και σε δύο διαστάσεις, για συνθήκες μη μόνιμης ροής. Σημειώνεται, ότι τα κύρια χαρακτηριστικά των αποτελεσμάτων της υδραυλικής προσομοίωσης, είναι η καταγραφή του μέγιστου βάθους ροής και των μέγιστων ταχυτήτων κατά μήκος του υδατορέματος, όπως φαίνονται στα παρακάτω υποκεφάλαια.

Στην παρούσα προσομοίωση, γίνεται προσέγγιση για συνθήκες μη μόνιμης ροής για το πλημμυρικό φαινόμενο που έλαβε χώρα τον Αύγουστο του 2020, ύστερα από έντονη βροχόπτωση στην ευρύτερη περιοχή της Εύβοιας.

Επιπλέον, τα κυριότερα προβλήματα που προέκυψαν, αποτελούν οι ζημιές που υπέστη η γέφυρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17, που βρίσκεται στον κεντρικό οδικό άξονα σύνδεσης Χαλκίδας – Βασιλικού, με αποτέλεσμα την προσωρινή διακοπή κυκλοφορίας σε αυτή, όπως και η κατάρρευση δρόμων στα παραλιακά και ειδικά στην περιοχή Λευκαντί, με τις ζημιές να είναι πολλές. Ουκ ολίγα καθίστανται και τα προβλήματα που εμφανίστηκαν στις υποδομές της ευρύτερης περιοχής, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το ποδοσφαιρικό γήπεδο της ομώνυμης ομάδας (Α.Ο.Φ. Λήλας), όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.18 και 4.19. Ακόμα, σοβαριές ζημιές υπέστησαν τα περιουσιακά στοιχεία των κατοίκων, με πολλά σπίτια να πλημμυρίζουν και πολλά αυτοκίνητα να καταστρέφονται ολοσχερώς, καθώς επίσης παρατηρείται ότι τμήματα από τις ακτές εξαφανίστηκαν, διότι το φαινόμενο παρέσυρε αυτά τα κομμάτια, με αποτέλεσμα να μην είναι πλέον προσβάσιμα. Αυτά απεικονίζονται στα Σχήματα 4.19 και 4.20.

Σχήμα 4.17: Ζημιές στη γέφυρα του Βασιλικού (Πηγή: Ζούγκλα, 2020)

Σχήμα 4.18: Ζημιά οδικού άξονα από την πλημμύρα (Πηγή: Μανδραβέλλος Δ., 2020)

Σχήμα 4.19: Καταστροφές στο γήπεδο του Α.Ο.Φ. Λήλα (Πηγή: Μανδραβέλλος Δ., 2020)

Σχήμα 4.20: Καταστροφή οχήματος από την πλημμύρα (Πηγή: Μανδραβέλλος Δ., 2020)

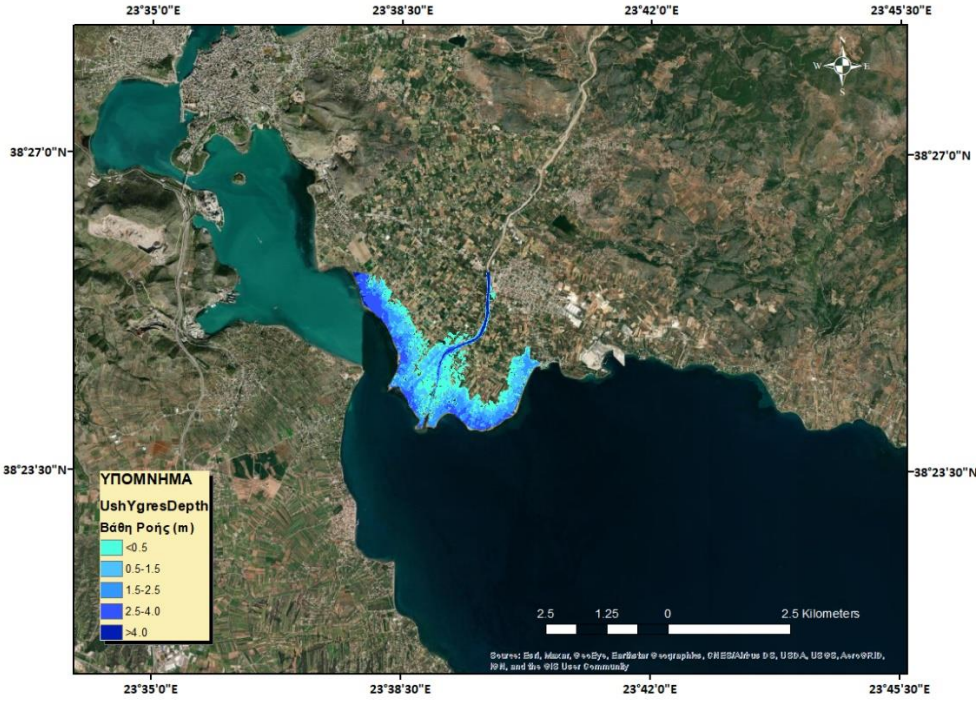
Σχήμα 4.21: Η αμμουδιά μετά το πλημμυρικό φαινόμενο (Πηγή: Μανδραβέλλος Δ., 2020)

4.2.1 Μέθοδος USH

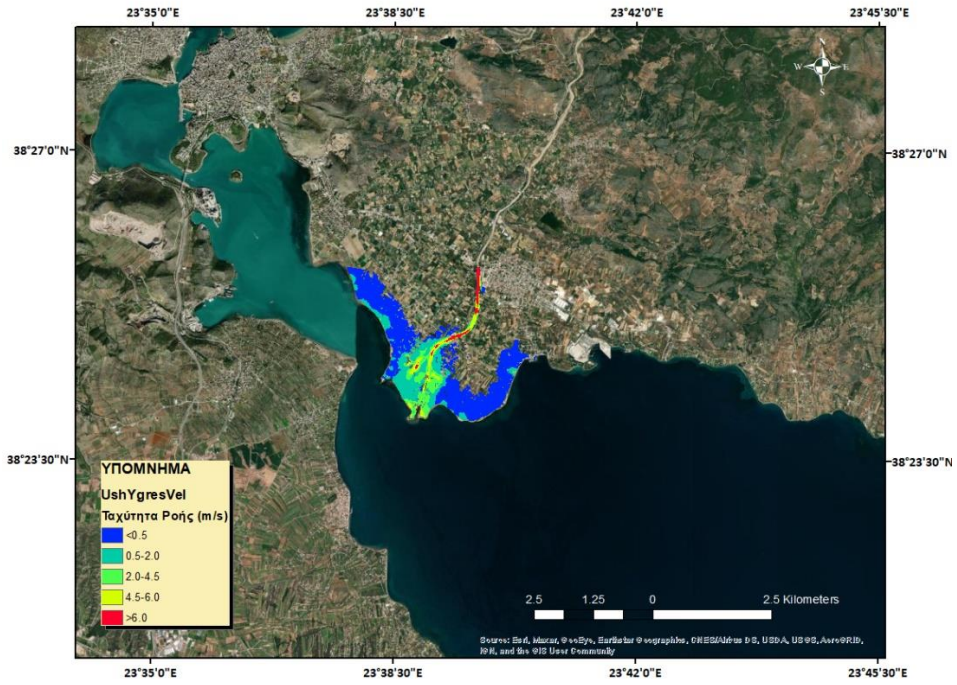
Τα αποτελέσματα, μέσω της μεθόδου USH, μοιάζουν πολύ με αυτά της πραγματικότητας που συνέβησαν τον Αύγουστο του 2020. Αρχικά, σε ξηρές συνθήκες, τα βάθη ροής αγγίζουν πολύ τις ρεαλιστικές τιμές που έλαβαν χώρα, καθώς και η χρονική στιγμή που προκλήθηκε το πλημμυρικό φαινόμενο. Χαρακτηριστικά, τα πρώτα σοβαρά προβλήματα και τα τηλεφωνήματα για έκακτη ανάγκη, ξεκίνησαν τις απογευματινές προς βραδινές ώρες της πρώτης ημέρας. Στα παρακάτω σχήματα, φαίνεται ότι εκείνες τις ώρες οι πλημμυρικοί όγκοι εξαπλώνονται στο μέγιστο. Τέλος, επισημαίνεται πως υπάρχει ομοιότητα στο ποιες περιοχές χτυπήθηκαν από την κακοκαιρία, οι οποίες ταυτίζονται με αυτές των αποτελεσμάτων του λογισμικού HEC-RAS. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα των βαθών ροής και των μεγίστων ταχυτήτων.

Σχετικά με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μέθοδο, παρατηρείται ότι κατά μήκος του ποταμού, το βάθος ροής ξεπερνάει τα 5 m και για όλες τις συνθήκες, ενώ στο σημείο εκβολής είναι μεταξύ 1.40 m έως 1.60 m, για ξηρές και υγρές συνθήκες αντιστοίχως. Από την άλλη, όσον αφορά την ταχύτητα ροής, κυμαίνεται μεταξύ 1.90 m/s και 2.20 m/s για τις παραπάνω καταστάσεις υγρασίας, εκεί όπου εκβάλει ο ποταμός. Κατά μήκος αυτού ξεπερνάει τη τιμή των 6 m/s. Τέλος, φαίνεται ότι σε αρκετά σημεία, κατά την ακτογραμμή, η τιμή του βάθους ροής κυμαίνεται μεταξύ 2.50 m και 4.00 m.

Υγρές Συνθήκες:

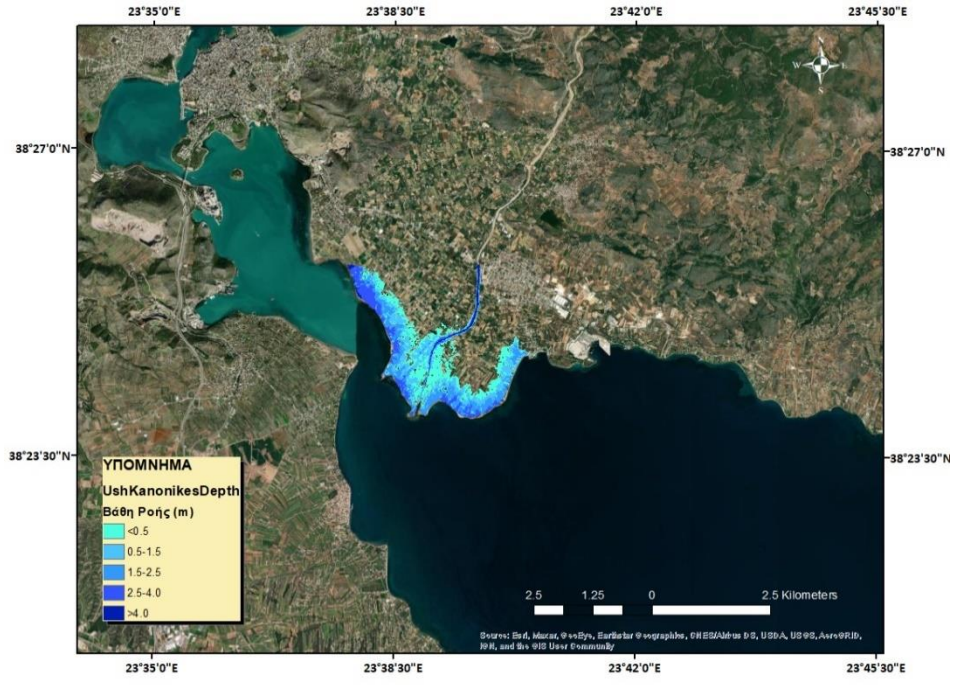


Σχήμα 4.22: Βάθη ροής από τη μέθοδο USH και για υγρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

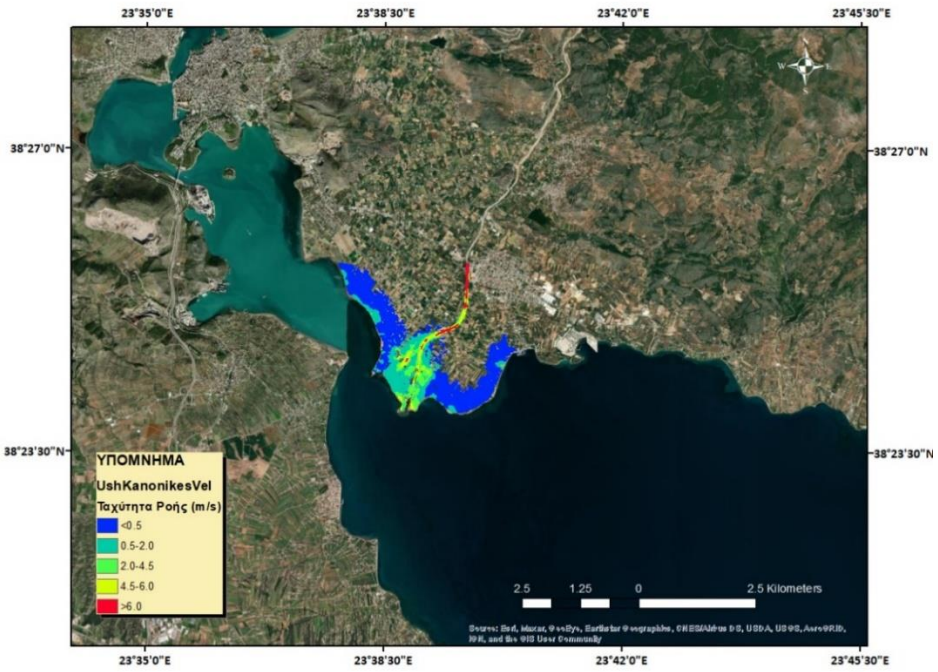


Σχήμα 4.23: Μέγιστες ταχύτητες από τη μέθοδο USH και για υγρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Κανονικές συνθήκες:

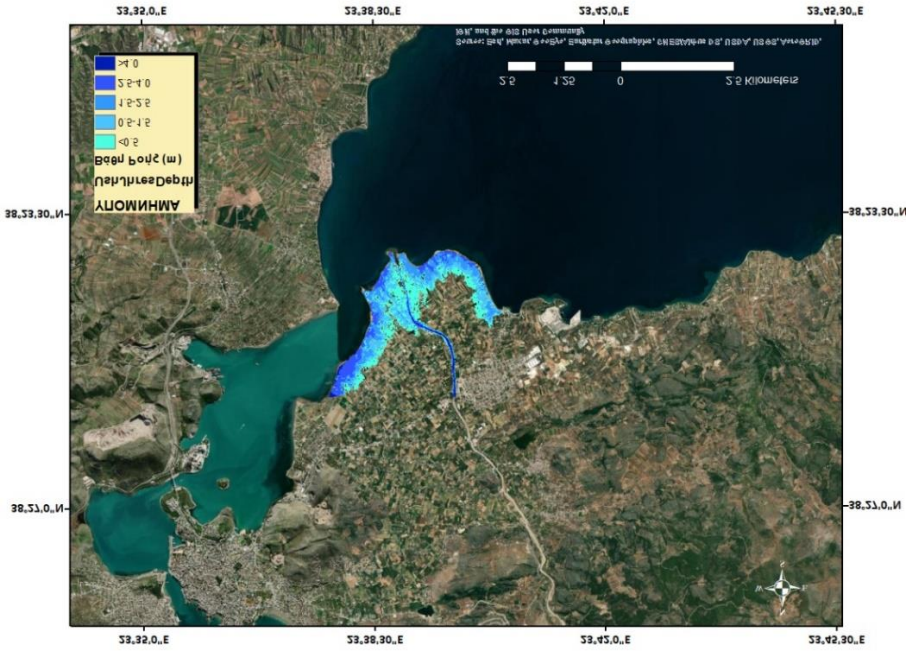


Σχήμα 4.24: Βάθη ροής από τη μέθοδο USH και για κανονικές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

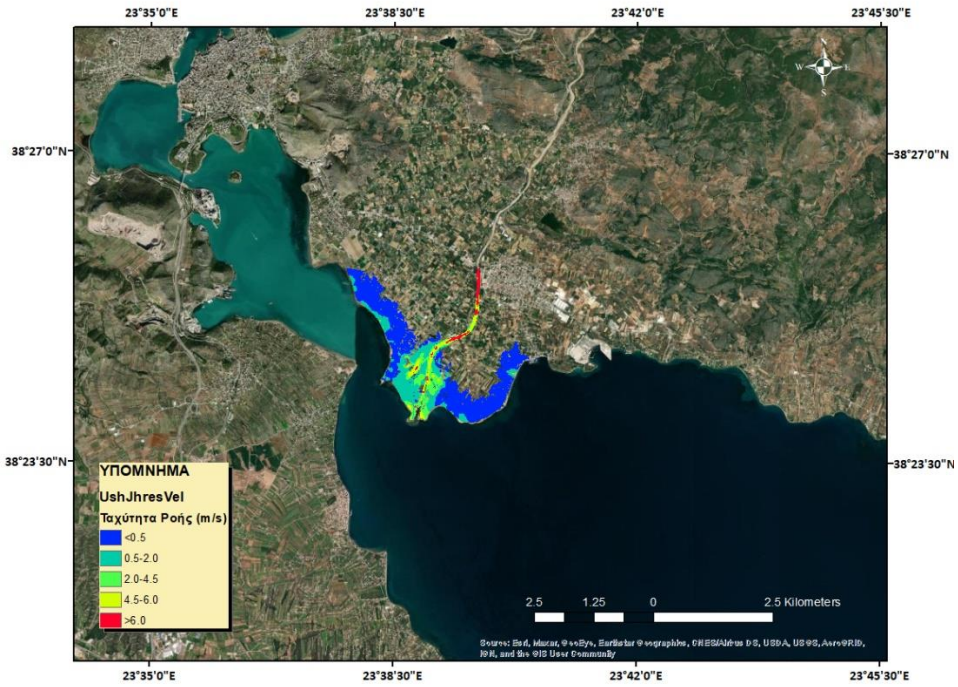


Σχήμα 4.25: Μέγιστες ταχύτητες από τη μέθοδο USH και για κανονικές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Ξηρές συνθήκες:



Σχήμα 4.26: Βάθη ροής από τη μέθοδο USH και για ξηρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



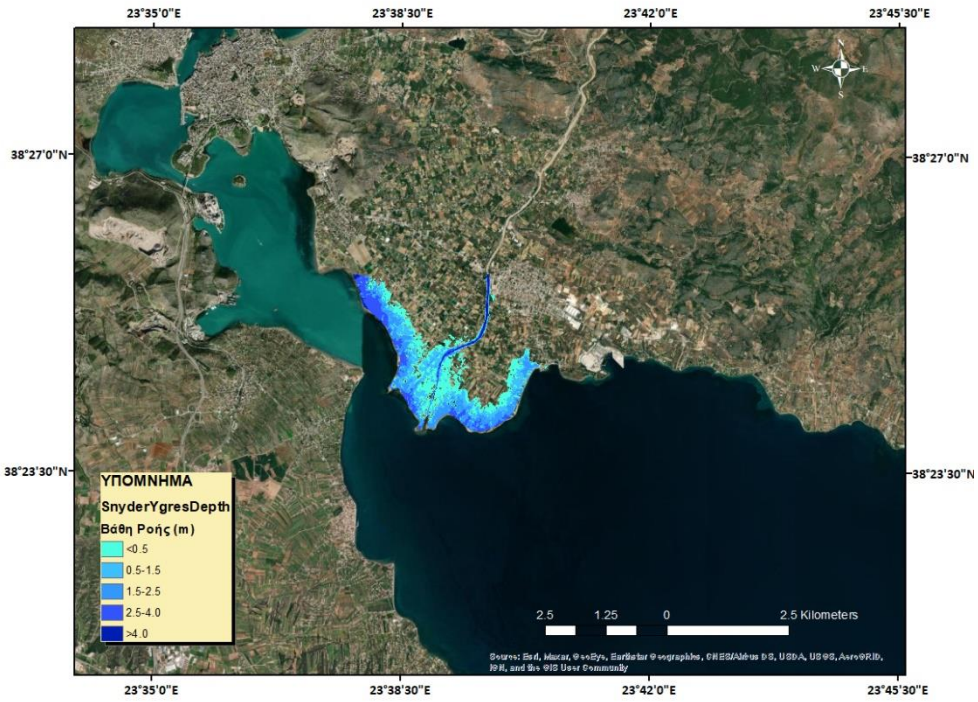
Σχήμα 4.27: Μέγιστες ταχύτητες από τη μέθοδο USH και για ξηρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

4.2.2 Μέθοδος Snyder

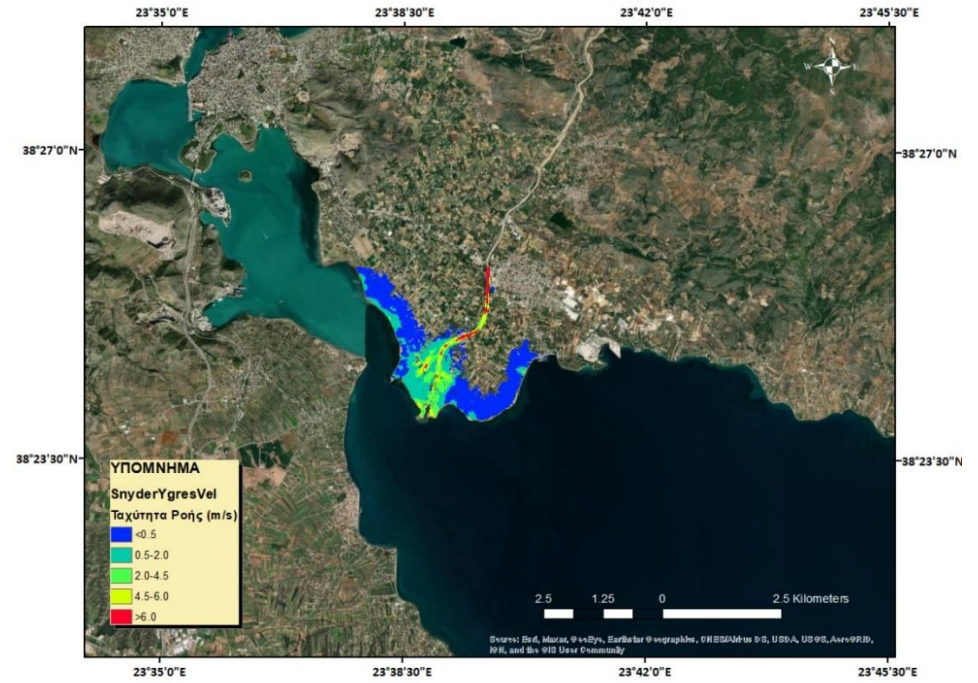
Τα αποτελέσματα με τη μέθοδο Snyder προσεγγίζουν πολύ αυτά της πραγματικότητας και για ξηρές συνθήκες. Οι περιοχές που επηρεάστηκαν από τους υδάτινους όγκους είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές που απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα. Επιπροσθέτως, όσον αφορά στο χρόνο που παρατηρούνται τα μέγιστα βάθη και η έκταση που καλύπτεται από αυτά, είναι συμβατά με τη πραγματικότητα.

Αναφορικά με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μέθοδο Snyder, φαίνεται ότι κατά μήκος του ποταμού, υφίστανται σημεία, για τα οποία το βάθος ροής ξεπερνάει τα 5 m και για όλες τις συνθήκες, ενώ εκεί που εκβάλει είναι μεταξύ 1.40 m έως 1.60 m, για ξηρές και υγρές συνθήκες αντιστοίχως. Αντίστοιχα, όσον αφορά τις ταχύτητες ροής, κυμαίνονται μεταξύ 1.80 m/s και 2.10 m/s για τις παραπάνω καταστάσεις υγρασίας, εκεί όπου εκβάλει ο ποταμός. Κατά μήκος αυτού ξεπερνάει τη τιμή των 6 m/s. Τέλος, στα παραλιακά τμήματα, υπάρχουν βάθη ροής μεταξύ 2.50 m έως 4.00 m.

<u>Υγρές συνθήκες</u>:

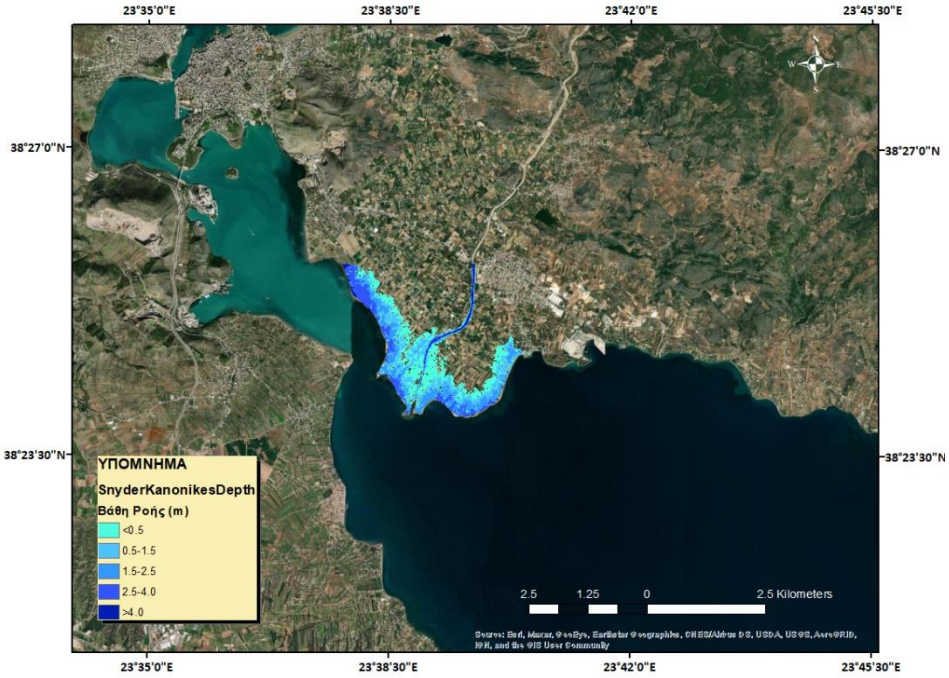


Σχήμα 4.28: Βάθη ροής από τη μέθοδο Snyder και για υγρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

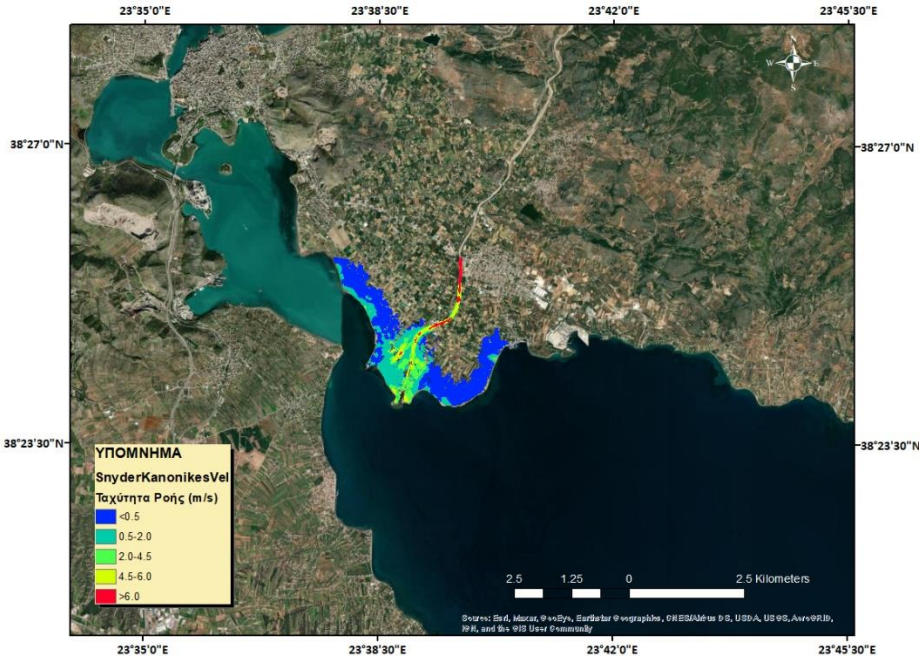


Σχήμα 4.29: Μέγιστες ταχτύτητες από τη μέθοδο Snyder και για υγρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Κανονικές συνθήκες:

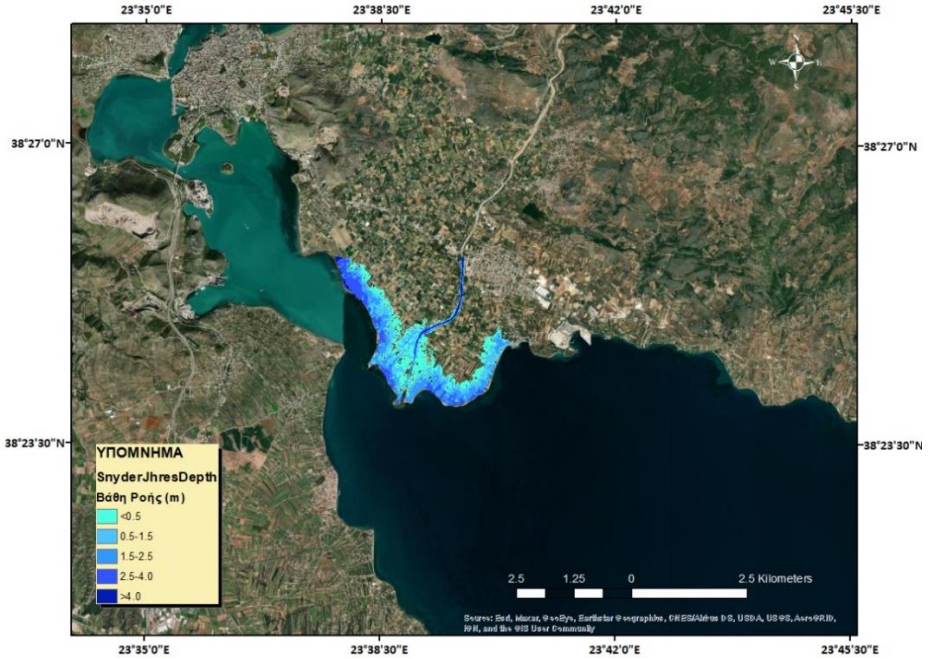


Σχήμα 4.30: Βάθη ροής από τη μέθοδο Snyder και για κανονικές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

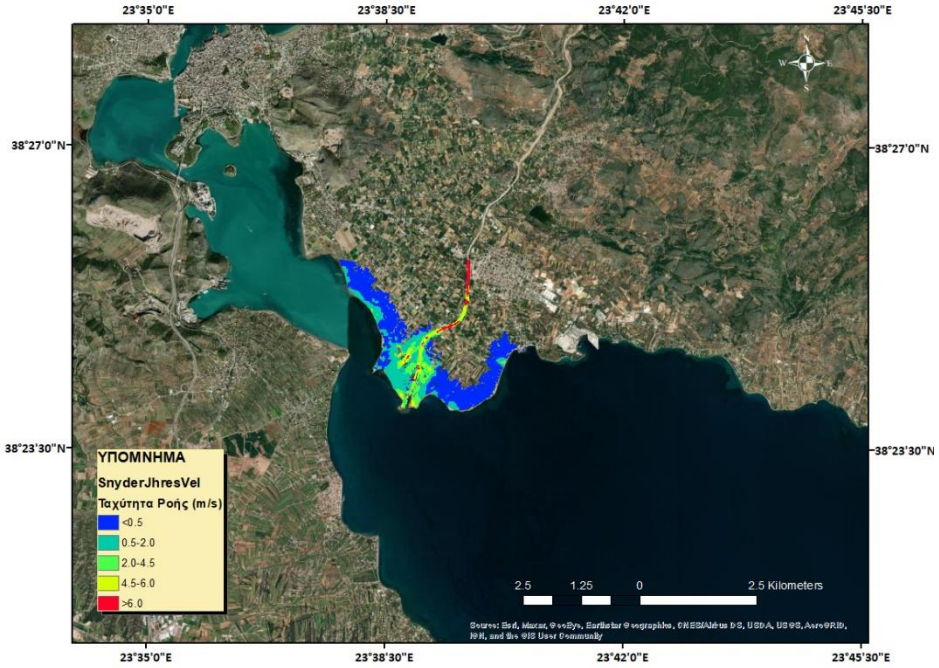


Σχήμα 4.31: Μέγιστες ταχύτητες από τη μέθοδο Snyder και για κανονικές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Ξηρές συνθήκες:



Σχήμα 4.32: Βάθη ροής από τη μέθοδο Snyder και για ξηρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



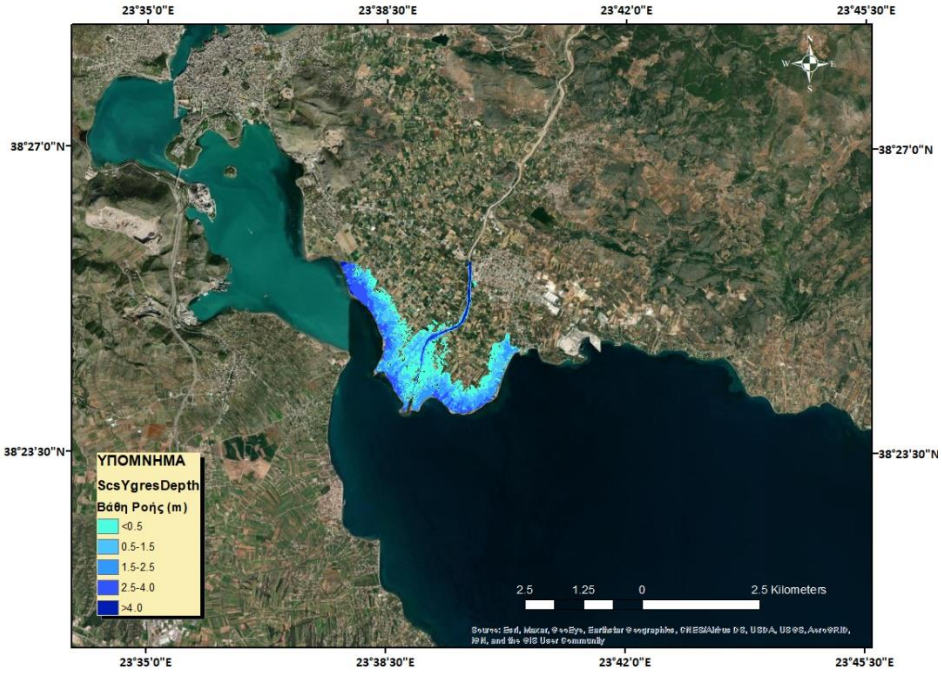
Σχήμα 4.33: Μέγιστες ταχύτητες από τη μέθοδο Snyder και για ξηρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

4.2.3 Μέθοδος SCS

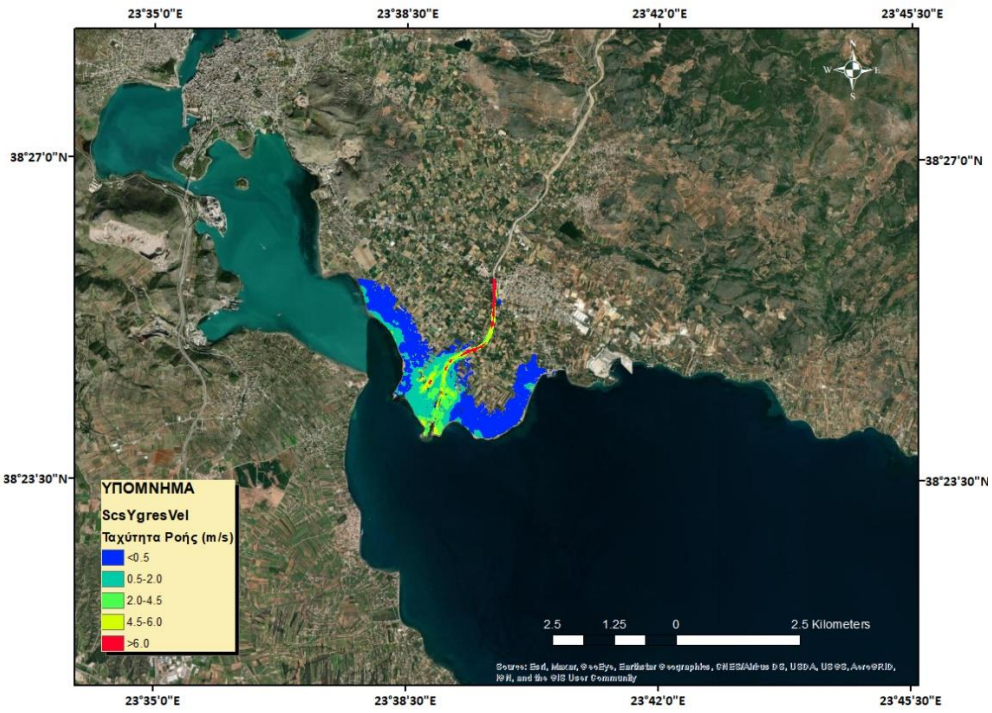
Εν συνεχεία, παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθόδου SCS, για όλες τις συνθήκες υγρασίας. Είναι συμβατά με τα ρεαλιστικά και πιο συγκεκριμένα οι ώρες αιχμής και η πλημμυρική έκταση ταυτίζεται με την πραγματικότητα.

Σχετικά με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μέθοδο, παρατηρείται ότι κατά μήκος του ποταμού, το βάθος ροής ξεπερνάει τα 5 m και για όλες τις συνθήκες, ενώ στο σημείο εκβολής είναι μεταξύ 1.40 m έως 1.50 m, για ξηρές και υγρές συνθήκες αντίστοιχα. Παράλληλα, όσον αφορά τις ταχύτητες ροής, κυμαίνεται μεταξύ 1.80 m/s και 2.20 m/s για τις παραπάνω καταστάσεις υγρασίας, εκεί όπου εκβάλει ο ποταμός. Κατά μήκος αυτού ξεπερνάει τη τιμή των 6 m/s. Όσον αφορά τα παράλια τμήματα, υπάρχουν βάθη ροής μεγαλύτερα των 2.50 m, που φτάνουν έως και τα 4.00 m.

<u>Υγρές συνθήκες</u>:

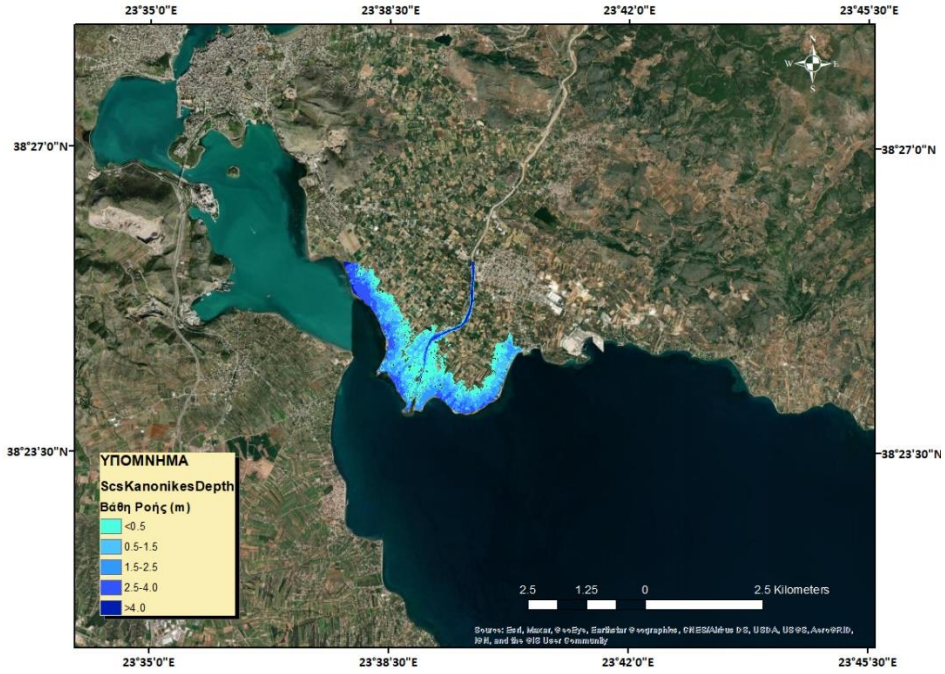


Σχήμα 4.34: Βάθη ροής από τη μέθοδο SCS και για υγρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

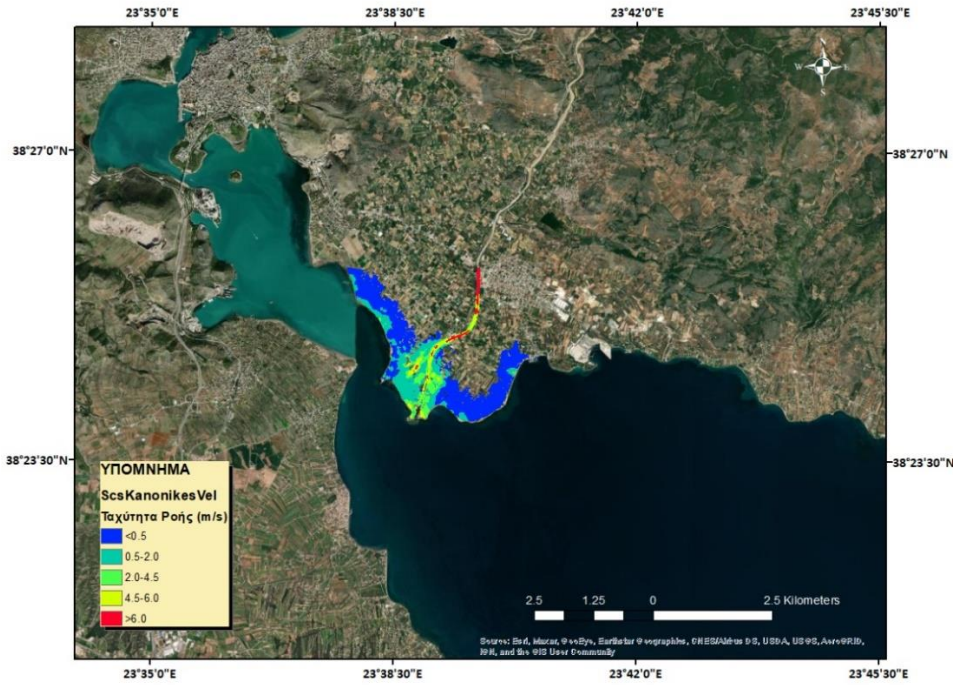


Σχήμα 4.35: Μέγιστες ταχύτητες από τη μέθοδο SCS και για υγρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Κανονικές συνθήκες:

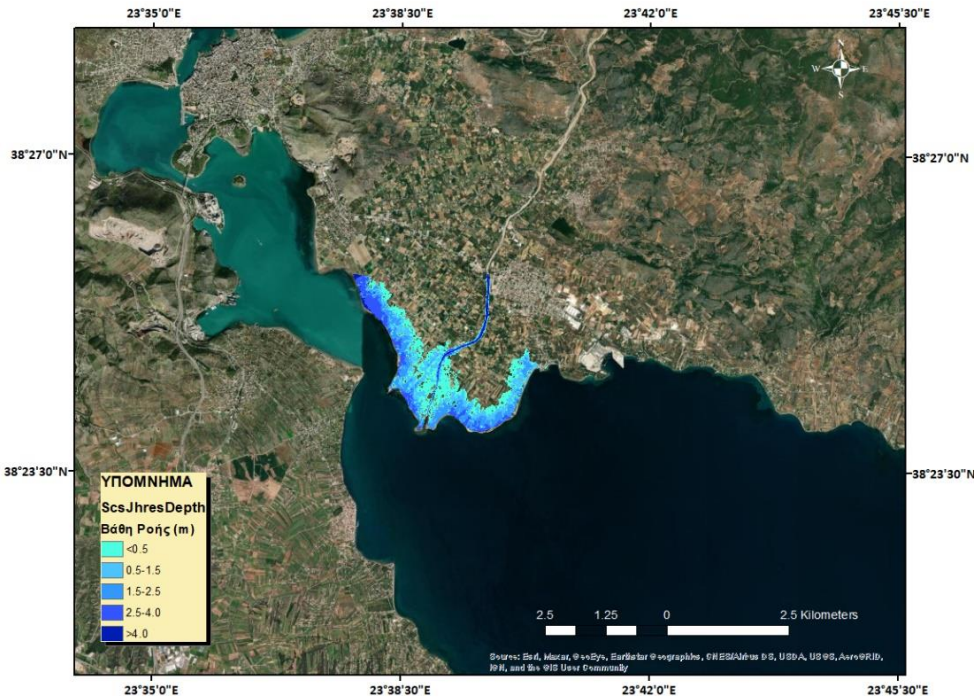


Σχήμα 4.36: Βάθη ροής από τη μέθοδο SCS και για κανονικές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

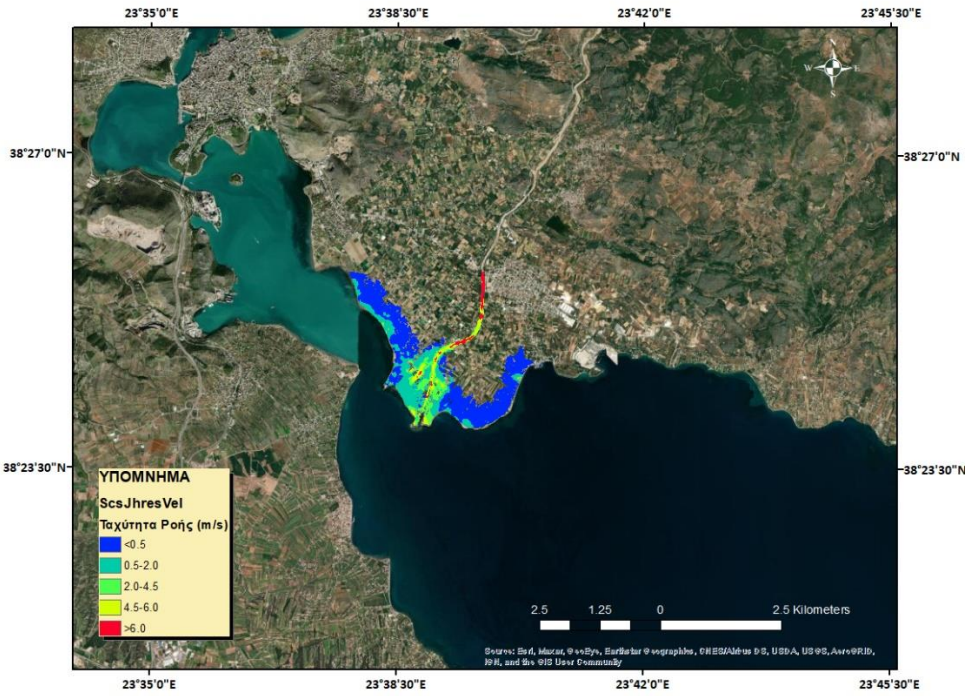


Σχήμα 4.37: Μέγιστες ταχύτητες από τη μέθοδο SCS και για κανονικές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Ξηρές συνθήκες:



Σχήμα 4.38: Βάθη ροής από τη μέθοδο SCS και για ξηρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 4.39: Μέγιστες ταχύτητες από τη μέθοδο SCS και για ξηρές συνθήκες (με χρήση του λογισμικού HEC-RAS) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ CN

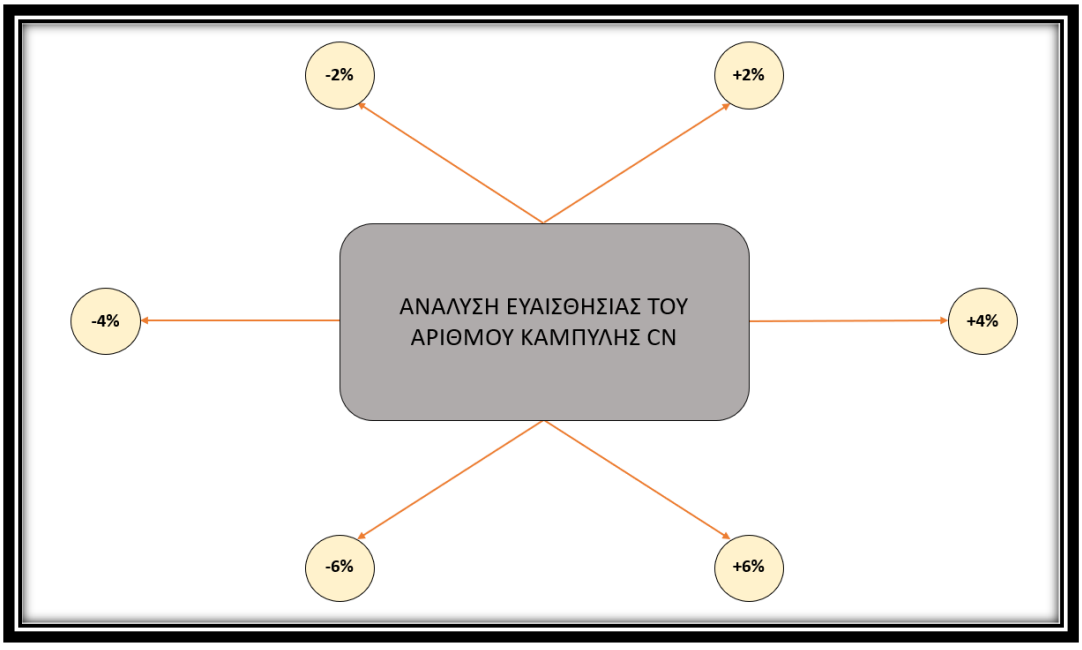
5.1 Πραγματικές Συνθήκες

Στη συγκεκριμένη εργασία, λαμβάνει χώρα η ανάλυση ευαισθησίας One Factor At a. Time, μιας πολύ σημαντικής παραμέτρου, του αριθμού καμπύλης CN. Η παράμετρος αυτή συμπεριλαμβάνεται στην υδρολογική ανάλυση και συγκεκριμένα στην εκτίμηση απωλειών βάσει της μεθόδου SCS. Η χρήση της συνίσταται για τον υπολογισμό της απορροής, καθώς σε αυτήν ενσωματώνονται οι επιδράσεις της χρήσης και εκμετάλλευσης της γης (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018). Στις συνθήκες προηγούμενης εδαφικής υγρασίας που έχουν ήδη αναλυθεί παραπάνω, οι τιμές που περιέχονται για τις εκάστοτε συνθήκες υγρασίας, φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Επισημαίνεται, ότι τα βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως η παροχή και ο χρόνος αιχμής του φαινομένου, μέσω των οποίων εκτελείται η υδραυλική προσομοίωση, έχουν μελετηθεί διεξοδικά.

Πίνακας 5.1: Αντιστοιχία συνθηκών υγρασίας και αριθμού καμπύλης (CN) (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Συνθήκες Υγρασίας	**Αριθμός Καμπύλης (CN)**
Υγρές - Χαμηλές	85
Κανονικές – Μέτριες	78
Ξηρές - Καλές	67

Στις μετέπειτα υποενότητες, εξετάζεται η μεταβολή της τιμής CN, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1:

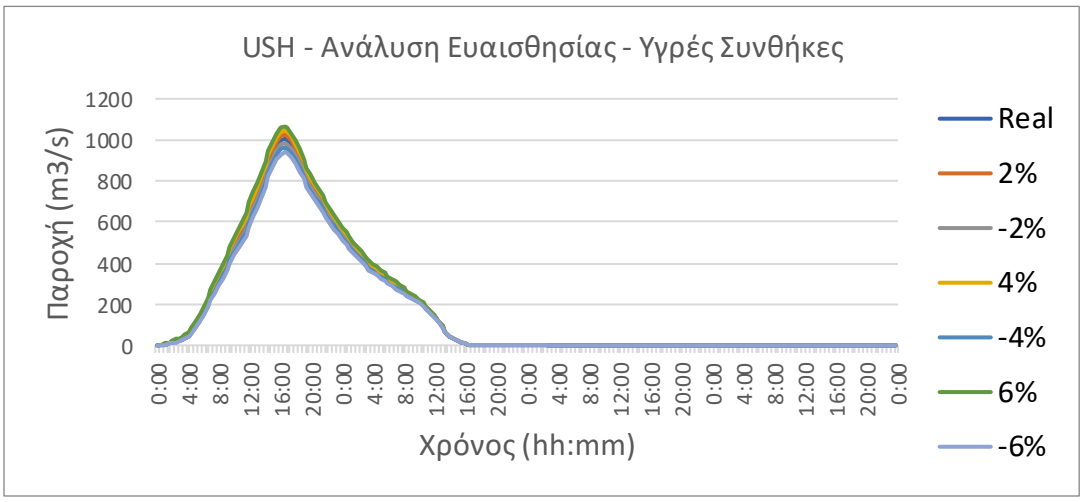


Σχήμα 5.1: Ανάλυση ευαισθησίας του Αριθμού Καμπύλης CN (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

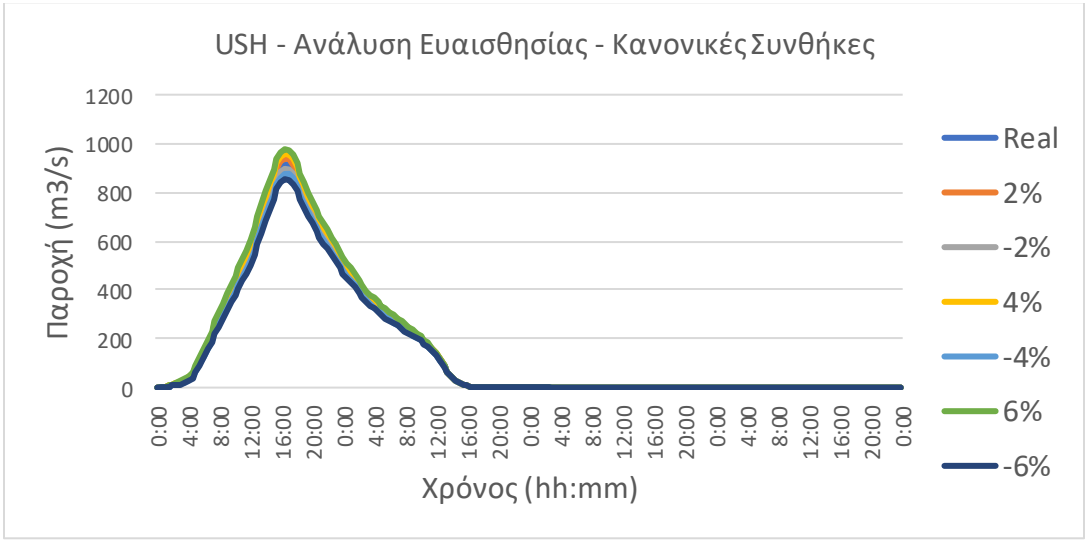
5.2 Πλημμυρογραφήματα Για Τις Διάφορες Μεθόδους

Στη συνέχεια, παρατίθεται η παραγωγή πλημμυρογραφήματος, για τις μεθόδους, που έχουν αναλυθεί. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας, για κάθε μέθοδο ξεχωριστά, με βασική προϋπόθεση τη διατήρηση των συνθηκών υγρασίας. Πρακτικά, εξετάζεται η μεταβολή του πλημμυρογραφήματος για μια συγκεκριμένη μέθοδο και για ίδιες συνθήκες κάθε φορά.

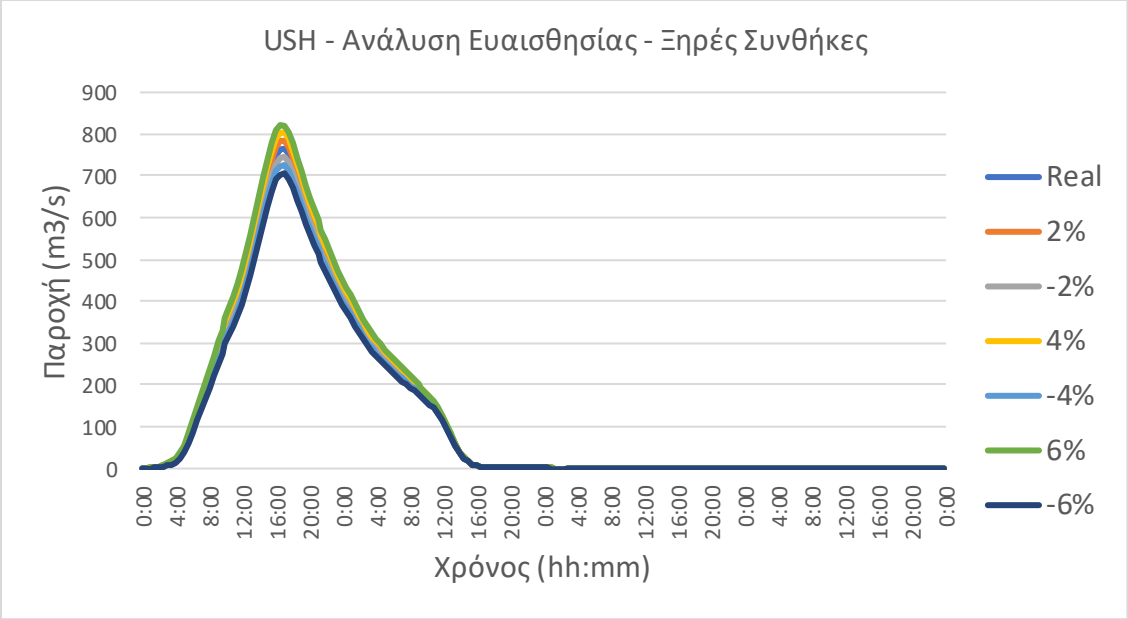
5.2.1 Μέθοδος United Specified Hydrograph (USH)



Σχήμα 5.2: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο USH και για υγρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

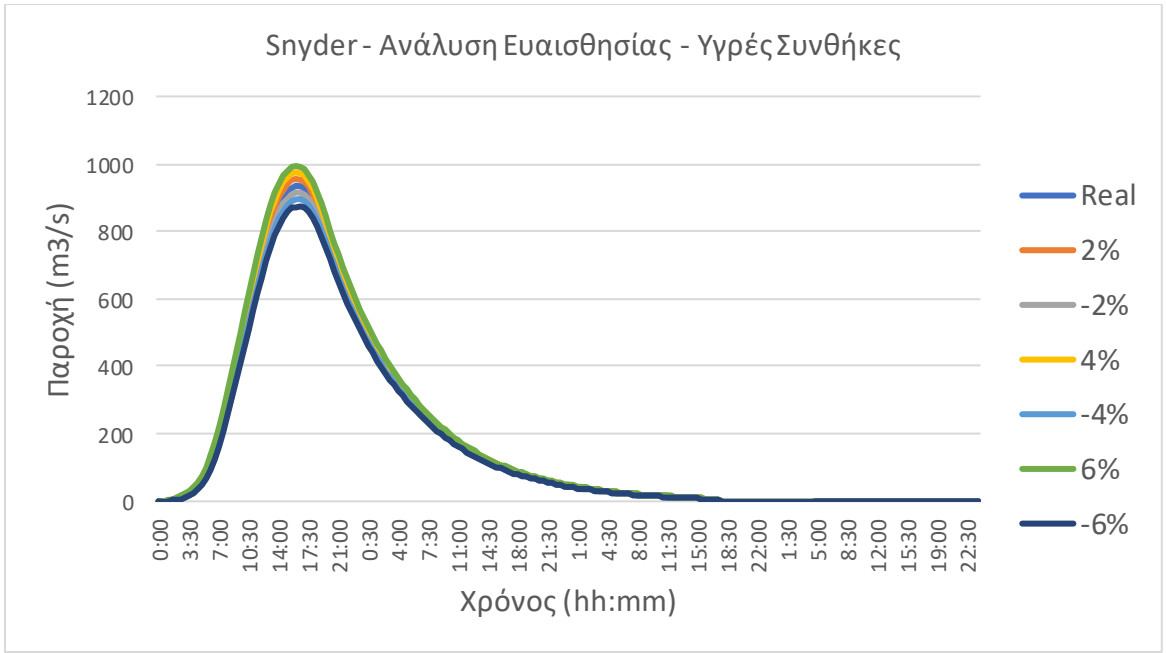


Σχήμα 5.3: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο USH και για κανονικές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

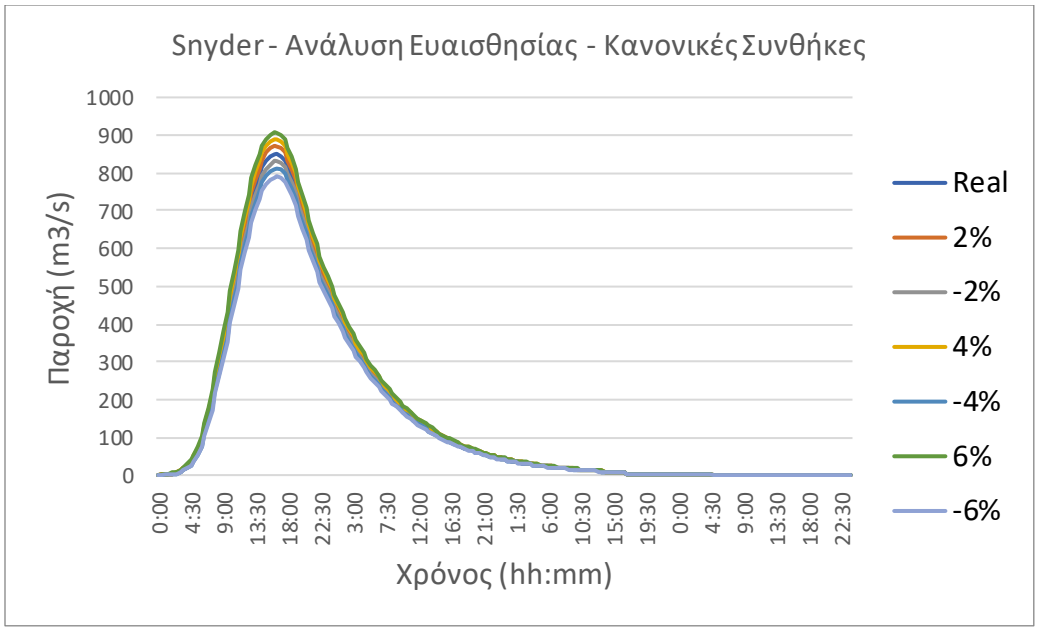


Σχήμα 5.4: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο USH και για ξηρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

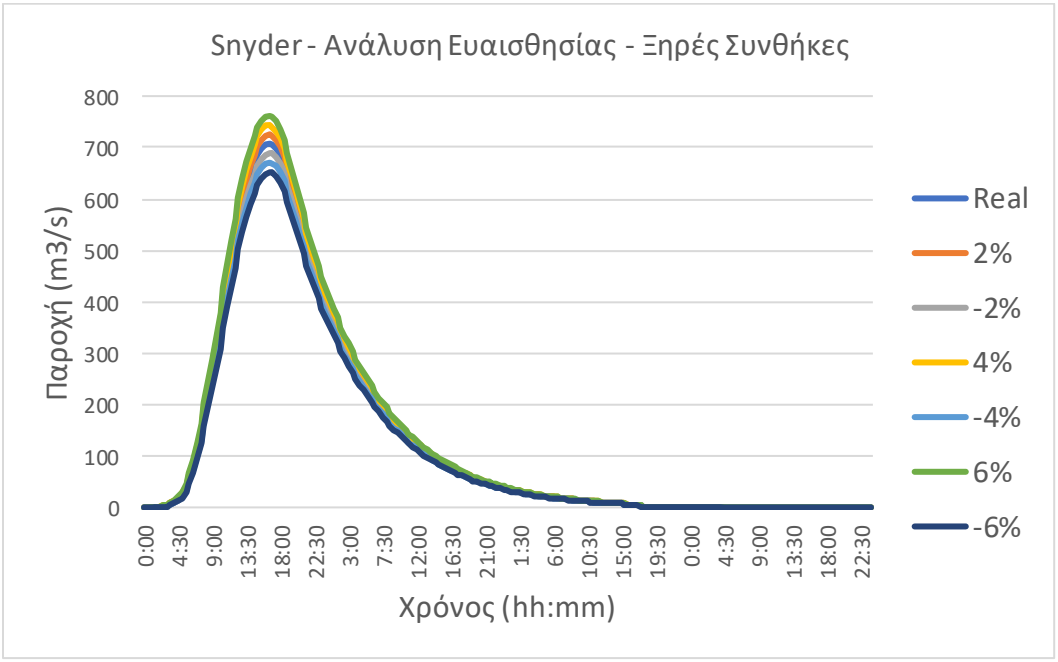
5.2.2 Μέθοδος Snyder



Σχήμα 5.5: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο Snyder και για υγρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

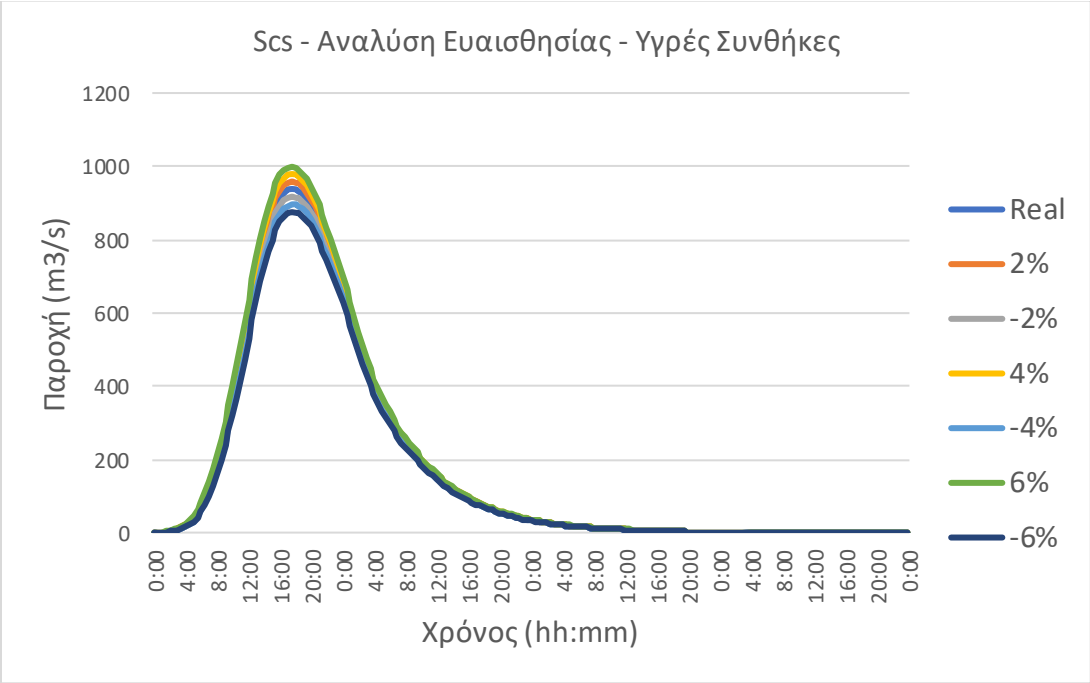


Σχήμα 5.6: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο Snyder και για κανονικές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

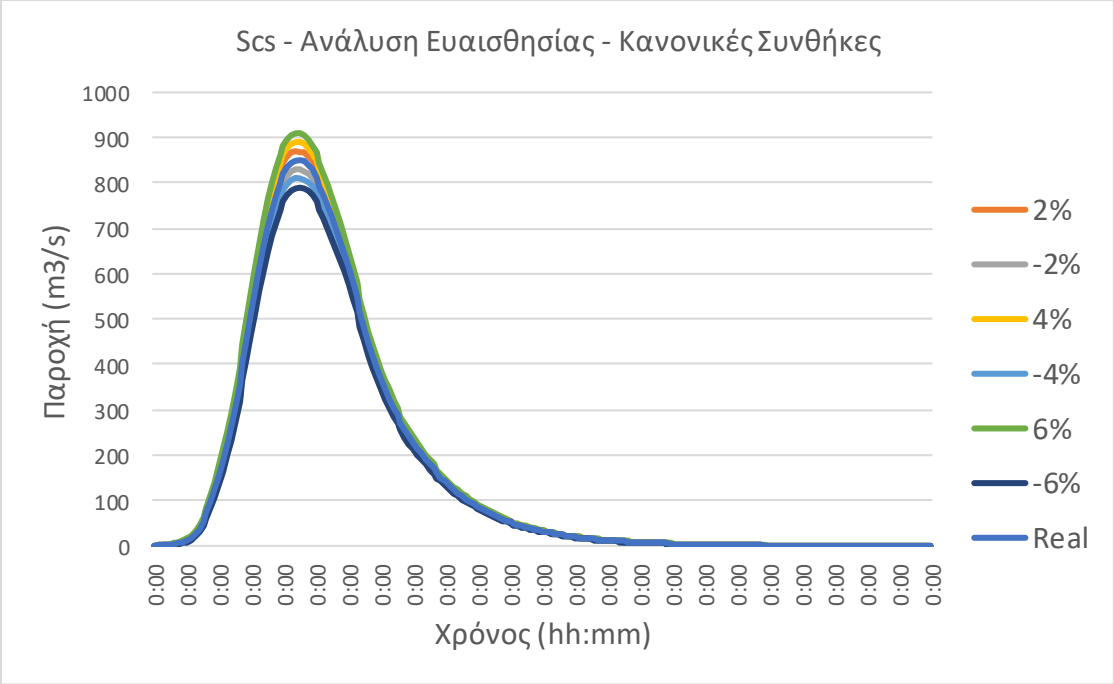


Σχήμα 5.7: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο Snyder και για ξηρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

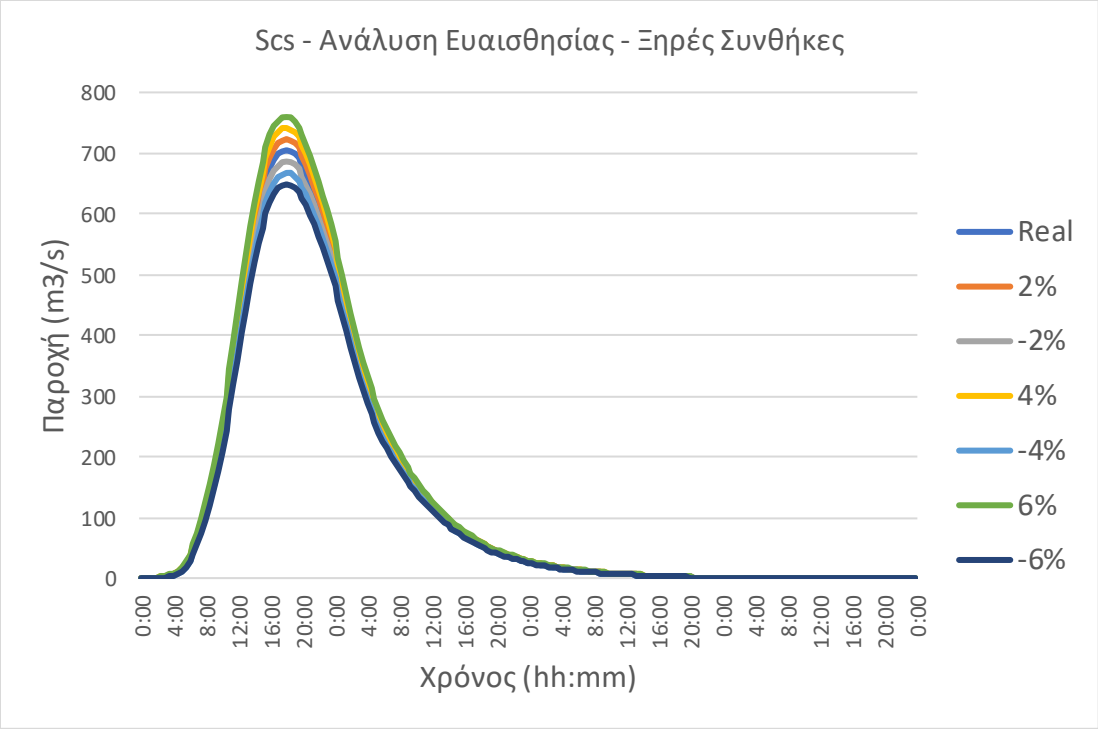
5.2.3 Μέθοδος SCS



Σχήμα 5.8: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο SCS και για υγρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 5.9: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο SCS και για κανονικές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

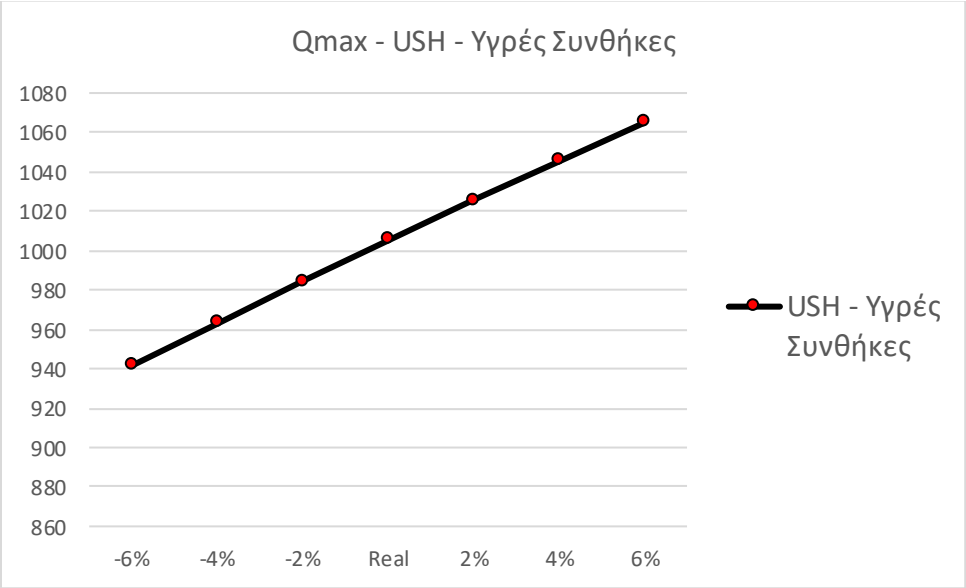


Σχήμα 5.10: Ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο SCS και για ξηρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

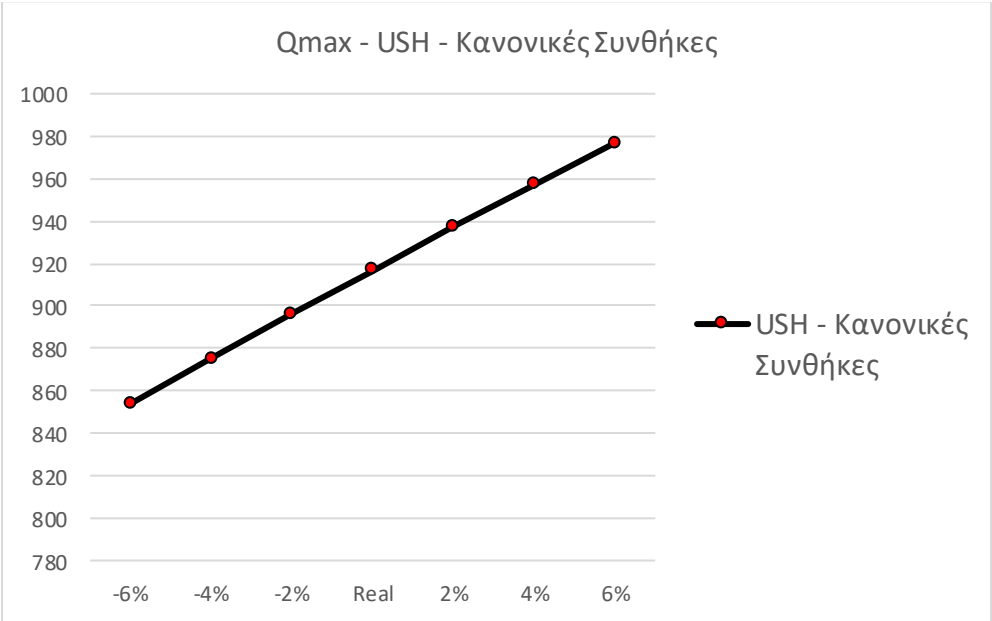
5.3 Μεταβολή Παροχής Αιχμής Για Κάθε Συνθήκη Υγρασίας

Παρακάτω, απεικονίζεται η μεταβολή της παροχής αιχμής για συγκεκριμένη μέθοδο και συνθήκη υγρασίας. Πρακτικά, εξετάζεται το πώς μεταβάλεται η ρεαλιστική τιμή, συγκριτικά με αυτές που προκύπτουν από την ανάλυση ευαισθησίας.

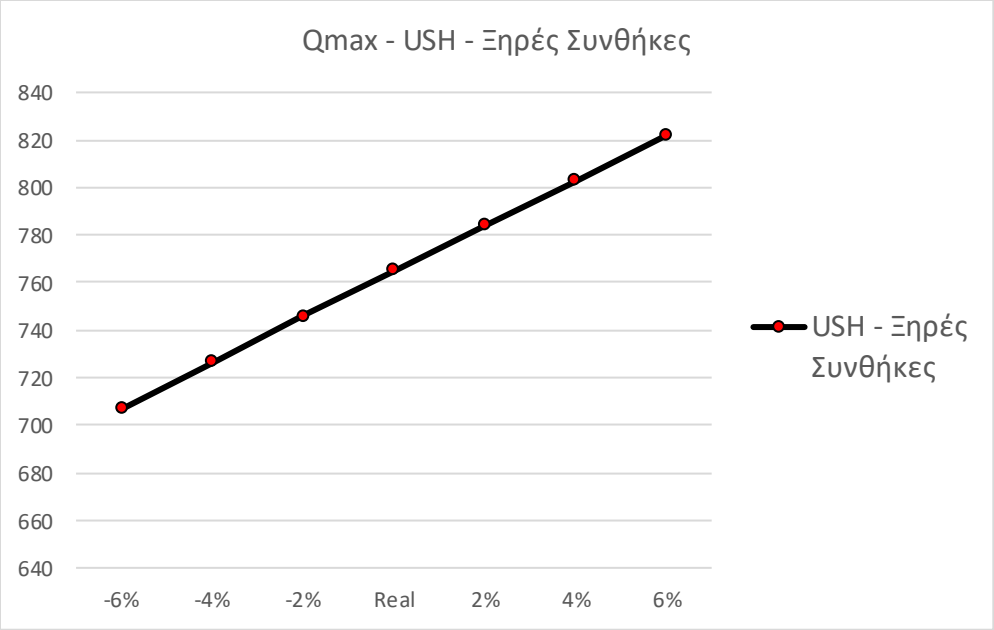
5.3.1 Μέθοδος USH



Σχήμα 5.11: Παροχή αιχμής με βάση την ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο USH και για υγρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

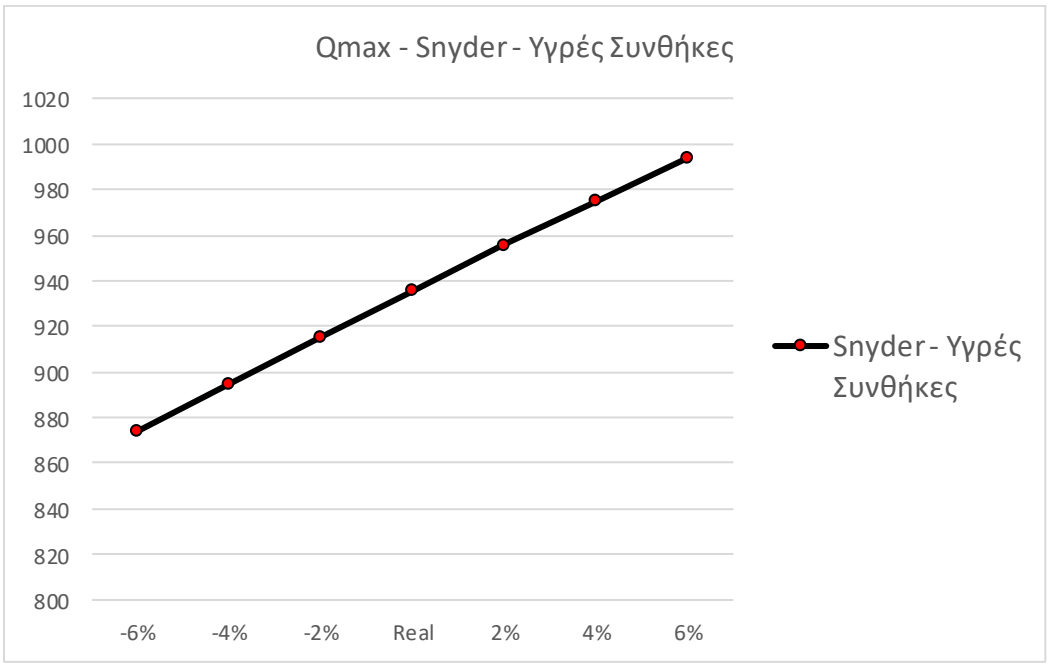


Σχήμα 5.12: Παροχή αιχμής με βάση την ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο USH και για κανονικές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

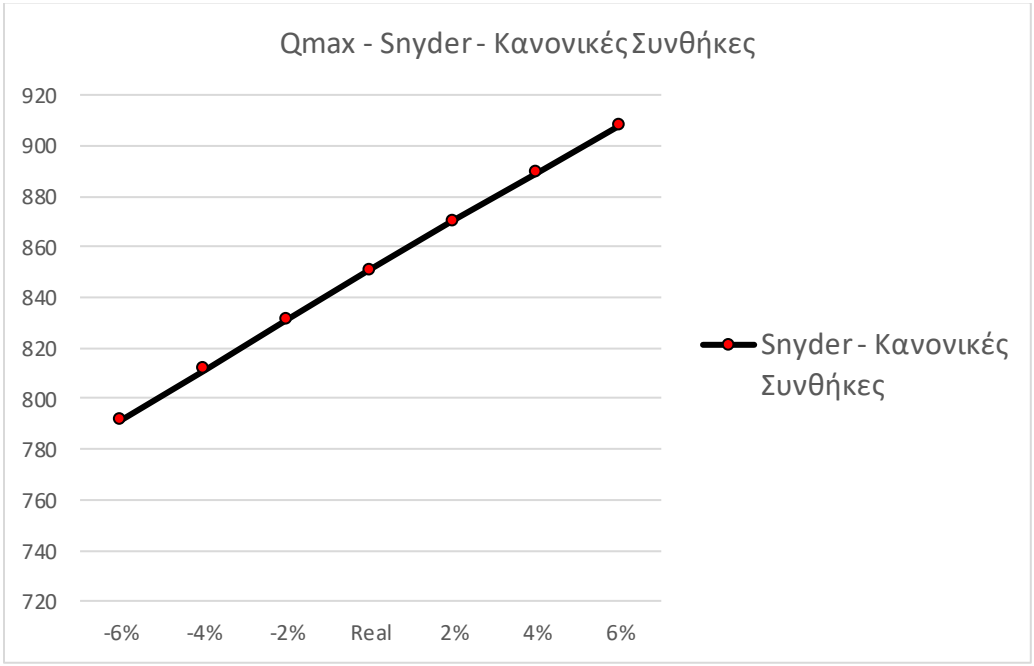


Σχήμα 5.13: Παροχή αιχμής με βάση την ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο USH και για ξηρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

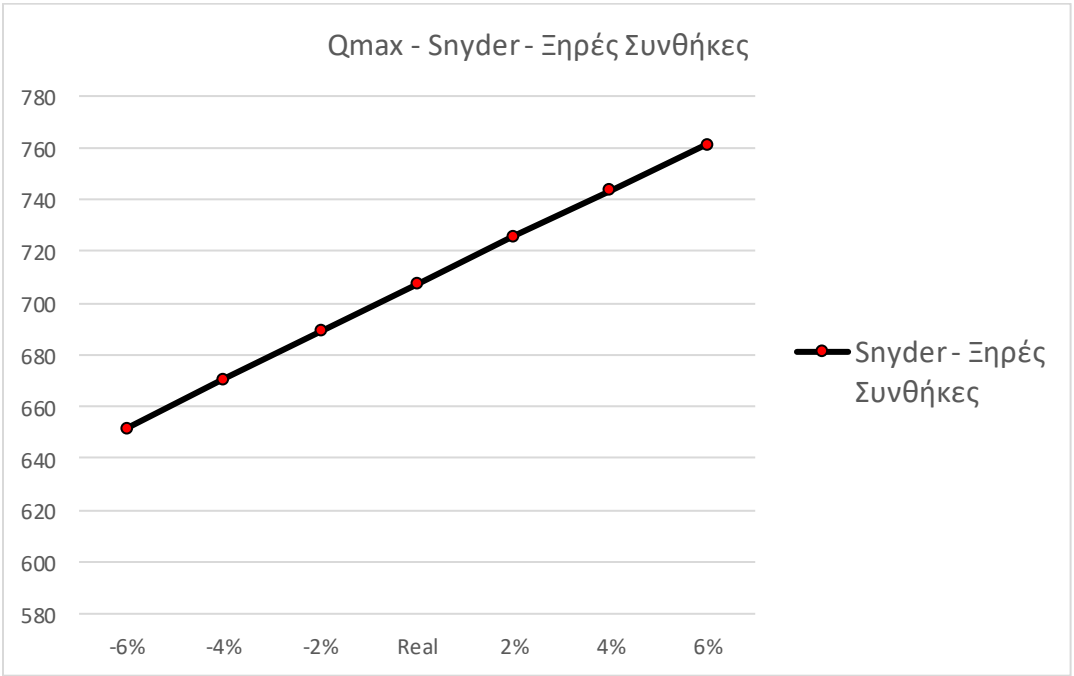
5.3.2 Μέθοδος Snyder



Σχήμα 5.14: Παροχή αιχμής με βάση την ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο Snyder και για υγρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

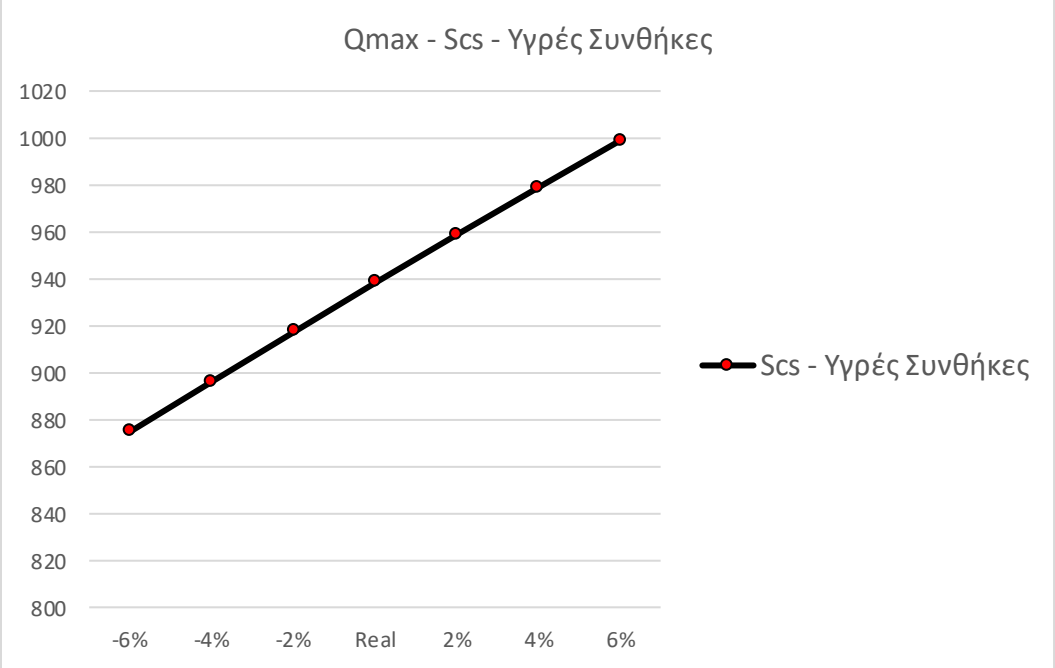


Σχήμα 5.15: Παροχή αιχμής με βάση την ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο Snyder και για κανονικές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

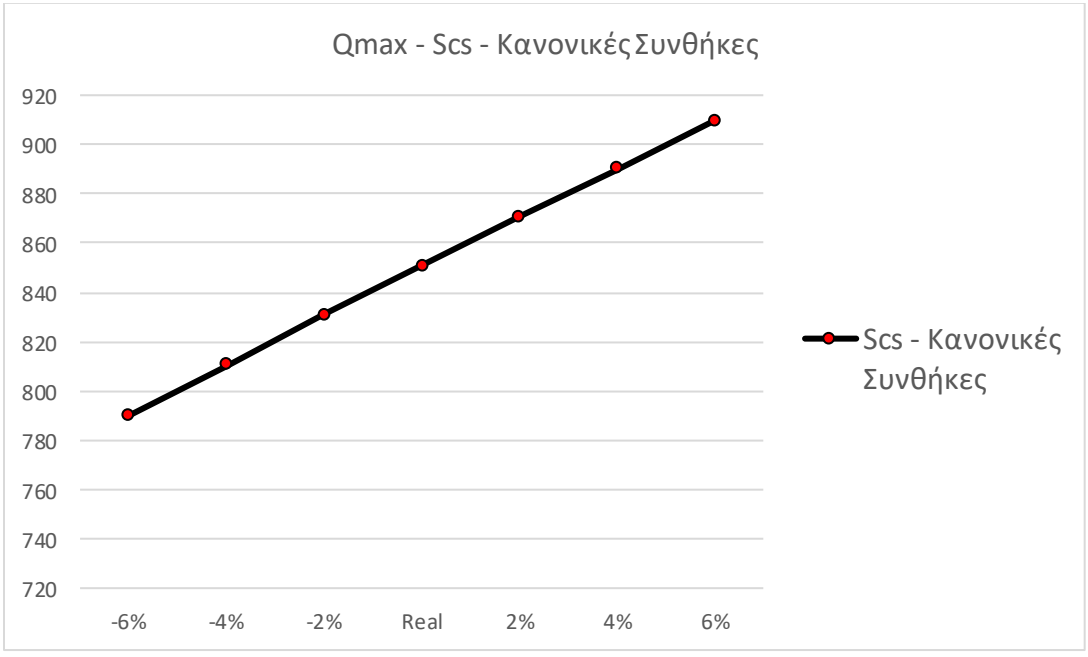


Σχήμα 5.16: Παροχή αιχμής με βάση την ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο Snyder και για ξηρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

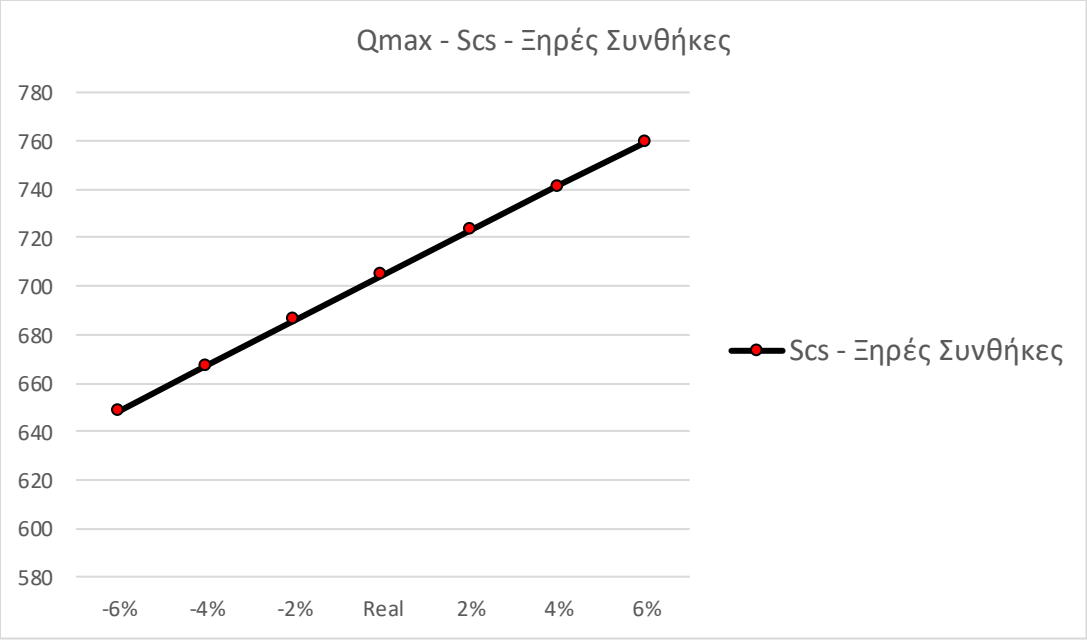
5.3.3 Μέθοδος SCS



Σχήμα 5.17: Παροχή αιχμής με βάση την ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο SCS και για υγρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



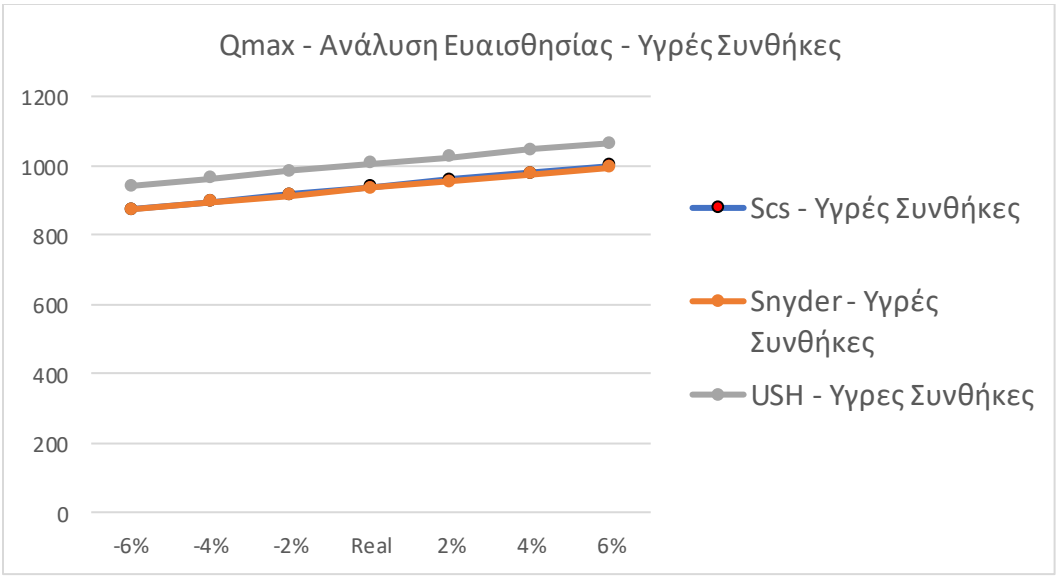
Σχήμα 5.18: Παροχή αιχμής με βάση την ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο SCS και για κανονικές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 5.19: Παροχή αιχμής με βάση την ανάλυση ευαισθησίας για τη μέθοδο SCS και για ξηρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

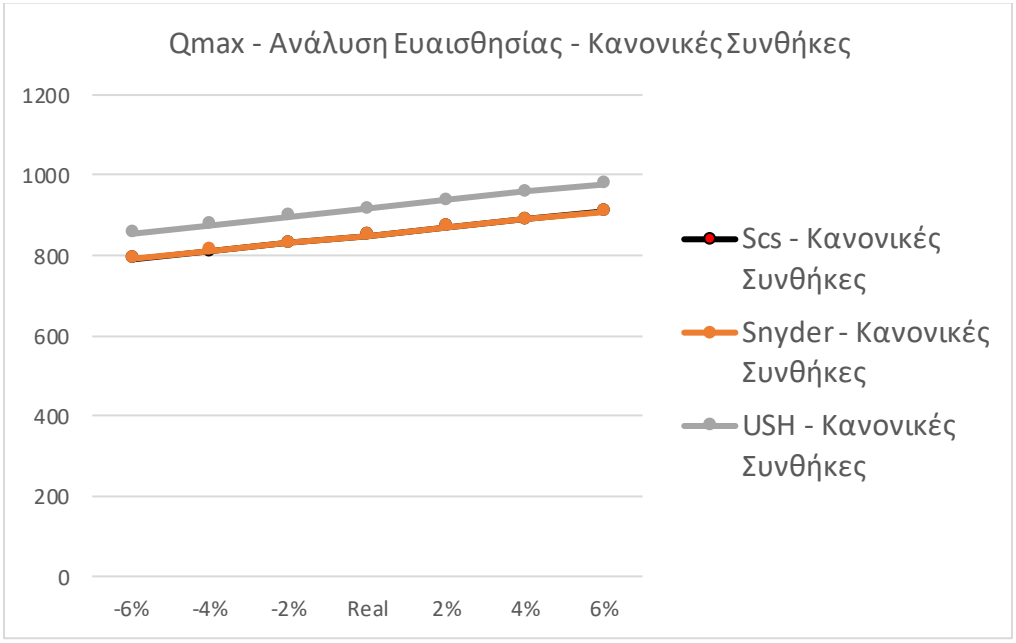
5.4 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

5.4.1 Υγρές συνθήκες



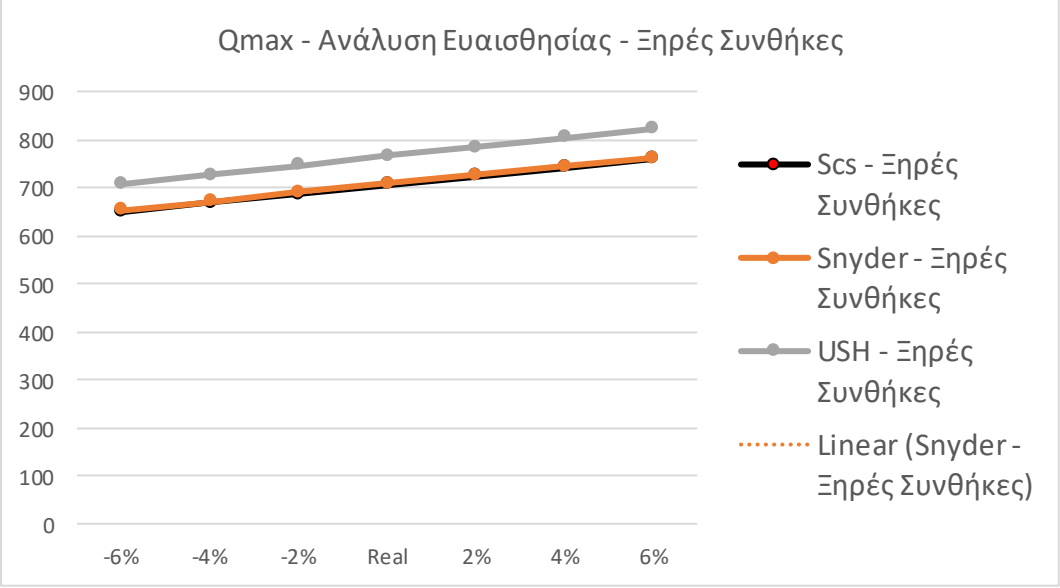
Σχήμα 5.20: Σύγκριση ανάλυσης ευαισθησίας όλων των μεθόδων και για υγρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

5.4.2 Κανονικές συνθήκες



Σχήμα 5.21: Σύγκριση ανάλυσης ευαισθησίας όλων των μεθόδων και για κανονικές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

5.4.3 Ξηρές συνθήκες



Σχήμα 5.22: Σύγκριση ανάλυσης ευαισθησίας όλων των μεθόδων και για ξηρές συνθήκες (Πηγή: ίδια επεξεργασία)

Παρατηρείται, ότι για όλες τις μεθόδους, υπάρχει τέλεια αναλογία, σχετικά με τη μεταβολή της παροχής αιχμής για όλες τις μεθόδους και για όλες τις συνθήκες. Φαίνεται η γραμμικότητα διαγραμματικά, συνεπώς η τιμή της αιχμής αυξάνεται γραμμικά, όσο αυξάνει ο αριθμός καμπύλης CN και αντίστοιχα μειώνεται, όσο μειώνει ο αριθμός καμπύλης CN. Αναλυτικά, παρατίθενται τα παρακάτω διαγράμματα, για την καλύτερη κατανόηση.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιείται ολοκληρωμένη προσέγγιση του κινδύνου πλημμύρας, για τον ποταμό Λήλα, ο οποίος βρίσκεται στην Εύβοια και εκβάλει στον Ευβοϊκό Κόλπο. Συγκεκριμένα, αναλύεται το πλημμυρικό επεισόδιο, το οποίο προέκυψε από την έντονη βροχόπτωση τον Αύγουστο του 2020. Βασική παράμετρος, η οποία λήφθηκε υπόψιν, καθίσταται η πλημμυρική επικινδυνότητα, με γνώμονα τις κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Σε πρώτη φάση, γίνεται χρήση του λογισμικού ArcMap, για την εύρεση της λεκάνης απορροής, όπως και για τις χρήσεις γης. Στη συνέχεια, επιλέγεται το κατάλληλο σημείο προσομοίωσης για τον ορισμό της υπολεκάνης εντός της οποίας διεξάγεται υδρολογική ανάλυση εφαρμόζοντας τις μεθόδους USH, Snyder και αυτή της SCS στο λογισμικό HEC-HMS, με σκοπό την παραγωγή του αντίστοιχου πλημμυρογραφήματος στην έξοδο της υπολεκάνης, το οποίο χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως δεδομένο εισόδου το μοντέλο HEC-RAS για την πραγματοποίηση της υδραυλικής προσομοίωσης κατάντη του σημείου προσομοίωσης.

6.2 Γενικά Συμπεράσματα

Βάσει της διερεύνησης που λαμβάνει χώρα για την ανάλυση του συγκεκριμένου επεισοδίου στην περιοχή μελέτης, προκύπτουν τα παρακάτω γενικά συμπεράσματα:

- ✓ Παρατηρείται ότι πολλές καταστροφές, εξαιτίας της πλημμύρας στην περιοχή, αφορούν κυρίως εκτάσεις καλλιεργήσιμες, οδικές συνδέσεις και υποδομές, με αποτέλεσμα την κακή λειτουργία των πληγέντων περιοχών.
- ✓ Κρίνεται απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψιν, πως οι πιθανές επιπτώσεις μιας πλημμύρας, οφείλονται σε διαφόρους παράγοντες της εξεταζόμενης περιοχής. Δηλαδή, σχετίζονται οι συνθήκες που καθορίζονται από φυσικούς, κοινωνικούς, οικονομικούς, τεχνικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες (Υπουργείο Προστασίας του Πολίτη, 2019).
- ✓ Η ορθότητα των αποτελεσμάτων, που προκύπτουν από την υδραυλική προσομοίωση, βασίζεται ιδιαίτερα στην ποιότητα και γενικότερα στην ανάλυση των δεδομένων εισόδου. Πιο αναλυτικά, όσο καλύτερη είναι η ανάλυση του DEM, τόσο πιο ακριβή καθίστανται τα αποτελέσματα. Αντιθέτως, όσο πιο αδρό είναι το DEM, τόσο πιο ανακριβής είναι η γεωμετρία και κατά συνέπεια, υφίσταται μεγαλύτερη πιθανότητα για την ύπαρξη σφαλμάτων. Επιπροσθέτως, βασικός παράγοντας για την ακρίβεια, αποτελεί ο συντελεστής τραχύτητας των εδαφών (Manning), τιμές οι οποίες λαμβάνονται από ειδικούς πίνακες.

- ✓ Επιπλέον, εντοπίζονται οι κρίσιμες περιοχές, που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Αναφορικά με τα βάθη ροής, παρατηρείται ότι στα τμήματα μέσα στον ποταμό, καθώς και σε εκείνα κατά μήκος της ακτογραμμής, εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές. Παράλληλα, όσον αφορά τις ταχύτητες ροής, το τμήμα μέσα στον ποταμό, καθώς και στο δέλτα του, απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή, διότι εκεί παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές. Τα παραπάνω, ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με την πραγματικότητα, καθώς πράγματι, τα μεγαλύτερα προβλήματα έλαβαν χώρα στο παραλιακό τμήμα της υπό εξέταση περιοχής και ζώνες πολύ κοντά στον ποταμό.

6.3 Ειδικά Συμπεράσματα

Η εφαρμογή των ανάλογων μεθοδολογιών, για την περιοχή μελέτης, εξάγει τα εξής ειδικά συμπεράσματα:

- ✓ Συμπεραίνεται ότι, η πλειοψηφία των προβλημάτων, λόγω πλημμυρικών φαινομένων για τη συγκεκριμένη περιοχή, οφείλονται κατά βάση στην έντονη βροχόπτωση, η οποία έχει μικρή διάρκεια.
- ✓ Η περιοχή, η οποία παρουσιάζει την υψηλότερη πλημμυρική επικινδυνότητα, αποτελεί το τμήμα, στην περιοχή που εκβάλει ο ποταμός. Ιστορικά, όπως και στην συγκεκριμένη περίπτωση, φαίνεται ότι καθίσταται πολύ ευάλωτη. Αυτό συμβαίνει, καθώς το υψόμετρο είναι χαμηλό, οι κλίσεις είναι μικρές και η αδιαπερατότητα υψηλή. Από τις χρήσεις γης, παρατηρείται ότι η κύρια χρήση είναι η αστική, ενώ σε μερικά τμήματα υπάρχουν καλλιεργούμενες εκτάσεις.
- ✓ Οι χρήσεις γης, έχουν σημαντική επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα, αφού συνδέονται με τον κίνδυνο της πλημμύρας. Ακόμη, από το χάρτη χρήσεων γης κατά Corine, λαμβάνονται υπόψη αρκετά στοιχεία, που χρησιμοποιούνται στο στάδιο της υδραυλικής μελέτης, μέσω του συντελεστή Manning, ο οποίος προκύπτει στην πραγματικότητα από της χρήσεις γης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη μελλοντική αλλαγή στον τρόπο που εξελίσσεται μία πλημμύρα. Σε περίπτωση που αυξηθεί ο αστικός ιστός, θα έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ακόμα πιο σοβαρών προβλημάτων στην υπό μελέτη περιοχή. Αυτό αποτελεί και τον λόγο, που κρίνεται αναγκαία η ακριβής αποτύπωση των χρήσεων γης, κατά τη διάρκεια της προσέγγισης.
- ✓ Αναφορικά με τη μέθοδο των ισόχρονων καμπυλών, συμπεραίνεται ότι έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα ως προς την παραγωγή του ΜΥΓ, συγκριτικά με τη μέθοδο Snyder και την SCS αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει, διότι δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη, να προσαρμόσει τα δεδομένα για μεγαλύτερη ακρίβεια.
- ✓ Επιπροσθέτως, η μέθοδος USH εμφανίζει τις μεγαλύτερες παροχές και συνεπώς οι τιμές παροχής αιχμής, που προκύπτουν από την ανάλυση ευαισθησίας είναι μεγαλύτερες, για τη μέθοδο USH, συγκριτικά με τη Snyder και SCS αντιστοίχως. Για παράδειγμα, για

ανάλυση ευαισθησίας +6% και σε υγρές συνθήκες υγρασίας, προκύπτουν μέγιστες παροχές για USH, Snyder και SCS οι τιμές 1057.9 m^3/s, 990.9 m^3/s και 990 m^3/s αντιστοίχως.

- ✓ Σχετικά με τα βάθη ροής, παρατηρείται ότι σε κάποια σημεία κατά μήκος του ποταμού, για όλες τις συνθήκες και μεθόδους αντίστοιχα, η τιμή ξεπερνά τα 5 m, ενώ αντίστοιχα η ταχύτητα ροής τα 6 m/s. Ωστόσο, στο σημείο εκβολής, το βάθος ροής κυμαίνεται μεταξύ 1.40 m έως 1.60 m, ενώ η ταχύτητα ροής 1.80 m/s έως 2.20 m/s, για τις μεθόδους που έχουν αναλυθεί, καθώς και για τις αντίστοιχες συνθήκες υγρασίας. Επιπλέον, σε μερικά σημεία στα παράλια, παρατηρείται ότι το βάθος ροής είναι μεταξύ 2.50 m - 4.00 m.
- ✓ Τέλος, παρατηρείται η ύπαρξη της γραμμικότητας στον τρόπο μεταβολής των παροχών αιχμής για όλες τις μεθόδους, που χρησιμοποιούνται κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες εδάφους.

6.4 Προτάσεις Για Μελλοντική Έρευνα

Μέσω της εκπόνησης, της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρατηρείται ότι προκύπτουν διάφοροι τομείς, που δύναται να διερευνηθούν. Χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης και για αυτό το λόγο, προτείνονται τα παρακάτω:

- ✓ Κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας, ως προς το συντελεστή Manning, καθώς συνίσταται βασική παράμετρος, για την υδραυλική προσομοίωση.
- ✓ Τα αντιπλημμυρικά έργα καθίστανται αναγκαία. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η κατασκευή διαφόρων τεχνικών έργων, όπως αναχώματα, τεχνητές λίμνες, για συγκράτηση ομβρίων και ενδεχομένως διαπλάτυνση του εύρους του ποταμού σε διάφορα σημεία κατάντη του σημείου προσομοίωσης.
- ✓ Στο πλαίσιο της υδραυλικής ανάλυσης, προτείνεται η εκτέλεση των υδραυλικών προσομοιώσεων και για άλλα ιστορικά επεισόδια, ώστε να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Επίσης, δύναται να βασιστεί η ανάλυση σε ενδεχόμενες δορυφορικές εικόνες, οι οποίες θα αποτελέσουν βάση αξιολόγησης.
- ✓ Ακόμη, κρίνεται σκόπιμη η διερεύνηση σεναρίων, που σχετίζονται στην πρόληψη των επιπτώσεων της πλημμύρας, για τις ευάλωτες περιοχές. Εν προκειμένω, εξετάζεται η κατασκευή περατών πεζοδρομίων και αναχωμάτων.
- ✓ Οι χρήσεις γης καθίστανται βασικός παράγοντας, για τα αποτελέσματα. Κρίνεται απαραίτητη η διερεύνησή του και πιο συγκεκριμένα να εξεταστούν σενάρια αστικοποίησης. Ωστόσο προτείνεται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψη, όσο το δυνατόν περισσότερα χαρακτηριστικά, από τις χρήσεις γης.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αλληλογραφία με Ε.Μ.Υ., 2021

Ανδρικοπούλου Θ. (2019) Ολοκληρωμένη προσέγγιση στην εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου – Η περίπτωση του Πηνειού ποταμού, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Δεβελέκου Μ. (2020) Εκτίμηση πλημμυρικού κινδύνου στο Βορειοδυτικό τμήμα της περιφερειακής ενότητας Ηρακλείου, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ, 2016

Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, Τεύχος 2ο, Αρ. Φύλλου 2019, 2015. Διαθέσιμο στο: http://wfdver.ypeka.gr/wp-content/uploads/2017/04/FEK_2019.B.2015_GR14-1.pdf

Καββαδά Ο., 2012, Ανάπτυξη μοντέλου βροχής – απορροής σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Κάβουρας Μ., Κόκλα Μ.., 2018, Εισαγωγή στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Διαδικτυακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα. Διαθέσιμο στο: http://mycourses.ntua.gr/courses/CIVIL1186/document/%D3%E7%EC%E5%E9%FE%F3%E5%E9%F2/%C4%E9%E1%EB%DD%EE%E5%E9%F2/1.%C5%E9%F3%E1%E3%F9%E3%DE_%F3%F4%E1_%D3.%C3.%D0.pdf

Κουτσογιάννης Δ., Ξανθόπουλος Θ., 2016, Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 4η, Διαδικτυακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα. Διαθέσιμο στο: https://www.itia.ntua.gr/el/getfile/115/10/documents/1999EngineeringHydrology.pdf

Μαθιουδάκη Μ. (2012) Διερεύνηση Παραμέτρων Υδρολογικού Σχεδιασμού με Χρήση Συνθετικών Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων μέσω Ανάλυσης Χαρακτηριστικών Επεισοδίων Πλημμύρας στην Πειραματική Λεκάνη Λυκορέματος Ραφήνας, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

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

Μαμάσης, Ν., 2014. Πλημμύρες – Υδρολογικές Εφαρμογές με τη χρήση GIS. Εκπαιδευτικό Υλικό Μαθήματος Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά Έργα, ΔΠΜΣ ΕΤΥΠ, ΕΜΠ, Αθήνα.

Μαρίνος Π., Τσιαμπάος Γ., Γεωλογία Μηχανικού, 2016

Μιμίκου Μ.Α., Μπαλτάς Ε.Α., (2018) Τεχνική Υδρολογία, 6η έκδ., Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα

Μπαλτάς Ε., Μπουρνάς Α., 2021, Εκτίμηση πλημμυρικού πεδίου με υδραυλική προσομοίωση σε περιβάλλον HEC-RAS 2D, Διαδικτυακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα. Διαθέσιμο στο: http://mycourses.ntua.gr/courses/PSTGR1011/document/%C7EC-HMS_HEC-RAS/8.HEC_RAS_presentation.pdf

Μπαλτάς Ε., Μπουρνάς Α., 2021, Υδρολογική και Υδραυλική Προσομοίωση λεκάνης απορροής με τα λογισμικά HEC-HMSκαι HEC-RAS 2D, Διαδικτυακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα. Διαθέσιμο στο: http://mycourses.ntua.gr/courses/PSTGR1011/document/%C7EC-HMS_HEC-RAS/HEC_Flood_Maps_Workflow.pdf

Μπαλτάς Ε., Μπουρνάς Α., 2021, Υδρολογική προσομοίωση σε περιβάλλον Hec – Hms, Διαδικτυακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα. Διαθέσιμο στο: http://mycourses.ntua.gr/courses/PSTGR1011/document/%C7EC-HMS_HEC-RAS/7.HEC_HMS_presentation.pdf

Μπαλτάς Ε., Φελώνη Ε., 2020, Υδρολογικό Μοντέλο Hec – Hms, Διαδικτυακές Σημειώσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα. Διαθέσιμο στο: http://mycourses.ntua.gr/courses/PSTGR1011/document/%C7EC-HMS_HEC-RAS/HEC-HMS.pdf

Οδηγία 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Ενσωμάτωση στο εθνικό δίκαιο σύμφωνα με την τροποποίηση ΚΥΑ 177772/924/2017 (ΦΕΚ 2140 Β'/20)

Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, Στάδιο ΙΙ, 4η Φάση, Παραδοτέο 17, Έκθεση Αποτελεσμάτων Διαβούλευσης, Τεχνική έκθεση ,2018. Διαθέσιμο στο: https://floods.ypeka.gr/egyFloods/gr07/Reports/II_4_P17_EL07.pdf

Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, Στάδιο ΙΙ, 1η Φάση, Παραδοτέο 15, Πρόγραμμα Διαβούλευσης, Τεχνική έκθεση ,2018. Διαθέσιμο στο: https://floods.ypeka.gr/egyFloods/gr07/Reports/II_1_P15_EL07.pdf

Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, Στάδιο Ι, 1η Φάση, Παραδοτέο 3, Ειδικές Περιοχές Εκτός Ζωνών Δυνητικά Υψηλού Κινδύνου Πλημμύρας, 2018. Διαθέσιμο στο: https://floods.ypeka.gr/egyFloods/gr07/Reports/I_1_P03_EL07.pdf

Σχέδιο Διαχείρισης Κινδύνων Πλημμύρας των Λεκανών Απορροής Ποταμών των Υδατικών Διαμερισμάτων Αττικής, Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας & Νήσων Αιγαίου (Βορείου και Νοτίου Αιγαίου), 1ο Στάδιο, 1η Φάση, Γεωλογικός Χάρτης, 2017. Διαθέσιμο στο: https://floods.ypeka.gr/egyfloods/gr07/gr07_maps_jpg_p01/GR07_S4B_geology.jpg

Τσουτσούρου Χ., 2012, Φυσικές καταστροφές και τεχνολογικά ατυχήματα στην Ευρώπη την πρώτη δεκαετία του 21ου Αιώνα, Διπλωματική εργασία, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας,Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2017), 1η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας (EL07), Ενδιάμεση Φάση 1, Παραδοτέο Π13: Προσχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών, 2017, Διαθέσιμο στο: http://wfdver.ypeka.gr/wp-content/uploads/2017/07/EL07_1REV_P13_Prosxedia_LAP_v01.pdf

Υπουργείο Προστασίας του Πολίτη, 2019

Χριστοφίδης Α.Δ., 2008, Ανάπτυξη μοντέλου βροχής – απορροής σε σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), Μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

BRUNNER G.W., 2016, HEC-RAS RIVER ANALYSIS SYSTEM HYDROLIC REFERENCE MANUAL, UNITED STATES

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

HEC-HMSUser's Manual, 2021, Hydrologic Modeling System ,Version 4.8 (https://users.auth.gr/vmarios/courses/DPMS/HEC-HMS/HEC-HMS%20User's%20Manual-v41-20210316_023441.pdf)

Huang, Y., 2005. Appropriate modeling for integrated flood risk assessment (p. 176). The Netherlands: University of Twente

Petrucci O., Aceto L., Bianchi C., Bigot V., Brazdil R., Pereira S., Kahraman A., Kilic O., Kotroni V., Llasat M., Llasat - Botija M., Papagiannaki K., Pasqua A., Rehor J., Geli J., Salvati P., Vinet F., Zezere J., 2019, Flood Fatalities in Europe, 1980 – 2018: Variability, Features, and Lessons to Learn.

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.

CORINE Land Cover (2018) Land Cover Dataset for 2012. https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012/. (Πρόσβαση στις 28/8/2021)

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

https://www.efsyn.gr (Πρόσβαση στις 10/1/2022)

https://www.evia365.gr (Πρόσβαση στις 16/11/2022)

https://www.eviaportal.gr (Πρόσβαση στις 13/1/2022)

https://www.floods.ypeka.gr (Πρόσβαση στις 14/1/2022)

https://www.meteofarm.gr (Πρόσβαση στις 16/1/2022)

https://www.mycourses.ntua.gr (Πρόσβαση στις 18/1/2022)

https://www.opengov.gr (Πρόσβαση στις 24/1/2022)

https://www.powergame.gr (Πρόσβαση στις 19/1/2022)

https://www.statistics.gr (Πρόσβαση στις 3/2/2022)

https://www.steni.gr (Πρόσβαση στις 7/2/2022)

https://www.tvstar.gr (Πρόσβαση στις 28/1/2022)

https://www.wikipedia.org (Πρόσβαση στις 18/2/2022)

https://www.zougla.gr (Πρόσβαση στις 8/2/2022)

https://www.land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012/ (Πρόσβαση στις 28/8/2021)