



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ CLARK
ΣΤΟΝ ΑΝΩ ΡΟΥ ΤΟΥ ΑΛΦΕΙΟΥ**



Στεφανίδης Ελευθέριος

Επιβλέπων: Ε. Μπαλτάς
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016

Στην οικογένεια μου,
Βασίλη, Κατερίνα και Γεωργία

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	v
Περίληψη	viii
Extended Abstract.....	x
A. Introduction	x
B. Study Area and Data used	xi
C. Methodology	xiv
D. Results	xvi
E. Conclusions and Future Research	xx
F. Selected references.....	xxi
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1. Υδατικοί πόροι και κατακρημνίσματα.....	1
1.2. Πλημμύρες	5
1.2.1. Πλημμύρες σε αστικές και περιαστικές περιοχές.....	5
1.2.2. Πλημμύρες στον κόσμο	7
1.2.3. Πλημμύρες στο Ελλαδικό χώρο.....	7
1.2.4. Αίτια των πλημμυρών	8
1.2.5. Αντιμετώπιση των πλημμυρών στην Ελλάδα.....	9
1.2.6. Αντιπλημμυρικά έργα	10
1.3. Οδηγίες.....	11
1.3.1. Οδηγία 2000/60/ΕΚ	11
1.3.2. Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ για αντιπλημμυρική προστασία.....	13
1.4. Αντικείμενο της εργασίας	14
1.5. Διάρθρωση της εργασίας	15

1.6. Κατάλογος λογισμικού εργασίας.....	15
Κεφάλαιο 2. Υδρολογική Ανάλυση σε Σ.Γ.Π. (GIS)	17
2.1. Γενικές πληροφορίες των Σ.Γ.Π.	17
2.2. Διανυσματικά και Ψηφιδωτά Μοντέλα	18
2.3. Υδρολογικά μοντέλα σε Σ.Γ.Π.	20
2.4. Κατηγορίες Υδρολογικών μοντέλων	22
2.4. Υδρογραφήματα.....	23
2.4.1. Υδρογράφημα απορροής	23
2.4.2. Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα	25
2.4.3. Το Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα	26
2.4.4. Σύνθετα Υδρογραφήματα	27
2.4.5. Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα.....	29
2.4.6. Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα με την μέθοδο Clark.....	30
2.5. Μοντέλα βροχής-απορροής	31
2.6. Παραδείγματα-Υδρολογικές εφαρμογές σε περιβάλλον Σ.Γ.Π.....	32
2.6.1. Υπολογισμός Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με την μέθοδο Clark's χρησιμοποιώντας μεθόδους Σ.Γ.Π.....	32
2.6.2. Αξιολόγηση χρόνου υστέρησης και χρόνου συγκέντρωσης σε μικρές λεκάνες ποταμών χρησιμοποιώντας τεχνικές Σ.Γ.Π.	34
2.6.3. Γεωμορφολογικά Στιγμαία Μοναδιαία Υδρογραφήματα σε περιβάλλον GIS χρησιμοποιώντας Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.	35
2.7. Λογισμικό ArcGis.....	37
Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης.....	43
3.1. Γεωγραφική θέση Αλφειού ποταμού και περιοχής μελέτης.....	43
3.2. Λεκάνη απορροής άνω ρου του Αλφειού ποταμού	45

3.2.1. Γεωμετρία-Ανάγλυφο	45
3.2.2. Υδρογραφικό δίκτυο	47
3.2.3. Χρήσεις γης.....	49
3.3. Πλημμύρες στην περιοχή μελέτης	51
3.4. Βροχογράφοι.....	52
Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία.....	55
4.1. Συλλογή – Ανάλυση – Προεπεξεργασία δεδομένων	55
4.1.1. Καμπύλη στάθμης - παροχής.....	55
4.1.2. Επέκταση καμπύλης στάθμης - παροχής	56
4.1.3. Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα για την καμπύλη στάθμης-παροχής	57
4.1.4. Μέθοδος πολυγώνων Thiessen	57
4.1.5. Δείκτης φ.....	58
4.1.6 Διαχωρισμός βασικής – άμεσης απορροής.....	59
4.1.7. Πορεία εξαγωγής παρατηρημένων Πλημμυρογραφημάτων.....	60
4.2. Ψηφιακό μοντέλο (GIS) Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με την μέθοδο του Clark's.	69
4.2.1. Χρόνος συγκέντρωσης.....	70
4.2.2 Χρόνος μεταφοράς δικτύου	79
4.2.3. Συντελεστής αποθήκευσης-εξασθένησης (R).....	80
4.2.4. Ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας.....	81
4.3. Υπολογισμός πλημμυρογραφημάτων	81
Κεφάλαιο 5. Βαθμονόμηση - Επαλήθευση μοντέλου	83
5.1. Αρχικές εκτιμήσεις	84
5.1.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων	84
5.2. Βαθμονόμηση μοντέλου	87
5.2.1 Γενικά περί βαθμονόμησης.....	87

5.2.2 Διαδικασία βαθμονόμησης	88
5.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης	90
5.2.4. Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης.....	92
5.3. Επαλήθευση μοντέλου.....	92
5.3.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων επαλήθευσης	93
5.3.2. Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων της επαλήθευσης.....	94
Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα - μελλοντική έρευνα	97
6.1. Σύνοψη.....	97
6.2. Συμπεράσματα	98
6.3. Μελλοντική έρευνα.....	98
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	101

Ευχαριστίες

Είμαι ευτυχής που κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βρέθηκα να έχω την καθοδήγηση και στήριξη πολλών αξιόλογων ανθρώπων, που ο καθένας με τον τρόπο του συνέβαλλε στην ολοκλήρωσή της. Από τη θέση αυτή αισθάνομαι, ως ελάχιστη υποχρέωση, την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά:

Τον Επιβλέποντα της εργασίας μου, Καθηγητή Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., κ. Ευάγγελο Μπαλά, τόσο για την υπόδειξη του συγκεκριμένου θέματος, όσο και για την καθοδήγησή του. Επίσης, για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης και συγγραφής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής Αξιολόγησης της Διπλωματικής μου Εργασίας, κ.κ. Ευάγγελο Μπαλά, Καθηγητή Ε.Μ.Π., Βασιλική Τσουκαλά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Ε.Μ.Π., Βασίλειος Τσιχριντζής, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για τις εύστοχες και καλοπροαίρετες κριτικές τους ώστε το παρόν πόνημα να είναι αρτιότερο. Τους είμαι ευγνώμων.

Την υποψήφια Διδάκτορα Ελισάβετ Φελώνη για την αμέριστη συμπαράσταση, κατανόηση, αλλά και για τις χρήσιμες συμβουλές της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η βοήθεια της ήταν πολύτιμη και ουσιαστική.

Επιπλέον, τους φίλους μου και συμφοιτητές μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών για τη μεγάλη κατανόηση και στήριξή τους το τελευταίο αυτό διάστημα εντατικής ενασχόλησής μου με την παρούσα εργασία και ολοκλήρωσης των σπουδών. Επίσης, την σύντροφό μου Σοφία για την μεγάλη συμπαράσταση της κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος, μου είναι αδύνατο να μην δώσω τις πιο θερμές ευχαριστίες στην οικογένειά μου για την αγάπη, την ηθική, και υλική συμπαράσταση τους σε όλα αυτά τα χρόνια και για τα εφόδια που μου έχουν προσφέρει ώστε να καταφέρω να αντιμετωπίζω τις δυσκολίες που παρουσιάζονται. Τους ευχαριστώ πραγματικά για όλα.

Στεφανίδης Ελευθέριος,

Αθήνα, 30.09.2016

Περίληψη

Τα φυσικά φαινόμενα είναι ιδιαίτερα δύσκολο να μοντελοποιηθούν και να αναπαρασταθούν με ακρίβεια καθώς δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει πλήρης γνώση των φυσικών νόμων που διέπουν τα φαινόμενα αυτά και τα διαθέσιμα δεδομένα για την υπάρχουσα κατάσταση είναι ελάχιστα ως ανεπαρκή. Συνεπώς τα μοντέλα που δημιουργούνται για τις διεργασίες αυτές είναι εννοιολογικά και η ακρίβεια τους εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων που ορίζονται.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση και προσομοίωση της απόκρισης της λεκάνης απορροής του ανω ρου του Αλφειού, μέχρι τη θέση του υδρομετρικού σταθμού Καρύταινας με τη χρήση πέντε επεισοδίων βροχής. Η εύρεση της απορροής για τα επεισόδια αυτά πραγματοποιήθηκε με χρήση του Υδρολογικού μοντέλου βροχής – απορροής του Clark. Τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν, τόσο στη φάση της βαθμονόμησης όσο και στη φάση της αξιολόγησης, συγκρίνονται με τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα. Οι υπολογισμοί του μοντέλου Clark's έγιναν σε περιβάλλον ArcGIS.

Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στην δυτική Πελοπόννησο και αναφέρεται ως άνω ρους του Αλφειού ποταμού με έκταση 870 km². Η περιοχή βρίσκεται κοντά στο χωρίο Καρύταινα του νομού Αρκαδίας και παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον από υδρολογική άποψη, λόγω των έντονων βροχοπτώσεων, του πλούσιου υδρογραφικού δικτύου και των συχνών πλημμυρών.

Τα δεδομένα των υδρομετρήσεων, της στάθμης των πέντε επεισοδίων και των βροχών στους σταθμούς ελήφθησαν από την Δεύτερη Έκθεση προόδου διδακτορικής διατριβής της Ε. Φελώνη (Πρωτογενής Πηγή ΔΕΗ). Οι δύο σταθμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι της Πιάνας και των Αραχαμίτων. Επιπλέον δεδομένα ελήφθησαν από τη χρήση χωρικών πληροφοριών (Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους DEM, χάρτης κάλυψης γης βάσει CORINE) και η επεξεργασία τους από το πρόγραμμα ArcGis 10.2 έδωσε την δυνατότητα αξιοποίησης των γεωμορφολογικών παραμέτρων της περιοχής για την προσομοίωση της περιοχής.

Extended Abstract

A. Introduction

The last ten years, Europe has suffered from more than 175 major floods, causing deaths, displacement of people and large economic losses. Projections reveal an increase to the intensity and frequency of floods. Most of the observed upward trend in flood damage can be attributed to socio – economic factors, such as increases in population, wealth and urbanization in flood – prone areas and to land use changes, such as deforestation and loss of wetlands and natural floodplain storage.

Floods are natural phenomena which cannot be prevented but through the right measures we can reduce their likelihood and limit their impacts. In addition to economic and social damage, floods can have severe environmental consequences, for example when industrial installations are inundated or wetland areas destroyed. The coming decades are likely to see higher flood risk and greater economic damage.

Natural phenomena are very difficult to be accurately simulated, as our knowledge of the physical laws that govern these phenomena is not complete and the available data on the current situation are inadequate. Therefore, the models that are created for these processes are conceptual and their accuracy depends on the values of the parameters.

Hydrological models are important for a wide range of applications, including water resources planning, development and management, flood prediction and design, and coupled systems modelling including, for example, water quality, hydro – ecology and climate. However, due to resource constraints and the limited range of available measurement techniques, there are limitations to the availability of spatial – temporal data (Pechlivanidis et al., 2011).

The Unit hydrograph (UH) concept was first proposed by Sherman (1932), on the basis of principle of superposition, and since then, UH has been used as an important technique for lumped rainfall - runoff data. Clark (1945) was the first to introduce the idea of Instantaneous Unit Hydrograph (CIUH) by combining the time – area diagram of the catchment with linear reservoir at catchment outlet. Nash (1957) proposed a conceptual model having a cascade of linear reservoirs and introduced the gamma distribution as unit hydrograph equation. The geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) was introduced by Rodriguez – Iturbe

& Valdez (1979), who used the geomorphological catchment characteristics to interpret the instantaneous unit hydrograph as a time – travel distribution; controlled by hillslope (Horton's geomorphologic law) and channel network response (Strahler's ordering scheme).

The subject of this research is to investigate the potential of a GIS – based rainfall – runoff model by using the Clark's synthetic unit hydrograph technique to estimate runoff response in a Greek catchment. As mentioned in the previous paragraph, Clark's methodology is a combination of the time – area diagram of the catchment with a linear reservoir at catchment outlet and it requires the estimation of three parameters: 1) the time of concentration, 2) the storage attenuation coefficient, and 3) the time – area histogram of the catchment. These parameters can be estimated by using information by the Digital Terrain Model (DTM), soil type and land use databases (Corine). Land use properties can be used to relate the rainfall volume to catchment response using the curve number (CN) method.

B. Study Area and Data used

The catchment of Alfeios river is located in Western Peloponnese, in Greece. The study analyzes a base area of the catchment, near the district of Karytaina, which is about 870 km². A 30,55×30,55 m² Digital Terrain Model (DTM or DEM) projected to the Greek coordinate system is used to identify the areas that contribute to the catchment. Land use data were downloaded from the Corine Land Cover 2000 database and projected to the current coordinate system. The hydrological soil groups were redefined and digitized based on soil type and permeability forming a geo – database to support the proposed methodology.

The northern part of the catchment belongs to the municipality of Gortinia and is characterized by steep slopes and rocky areas with medium and high elevation. The eastern part of the catchment belongs to the municipality of Tripoli and has smooth and steep slopes with high elevation. The main part (70%) of the catchment belongs to the municipality of Megalopoli and has chiefly smooth slopes with medium elevation. The drainage network is rich, as a result of the great amount of rainfall. Flash floods are common in the area while snow fall is common seen at higher elevation. The catchment is elongated in the NS direction and has an average altitude of 750 m (altitude varies between 338 & 1850 m) (Figure 1.).

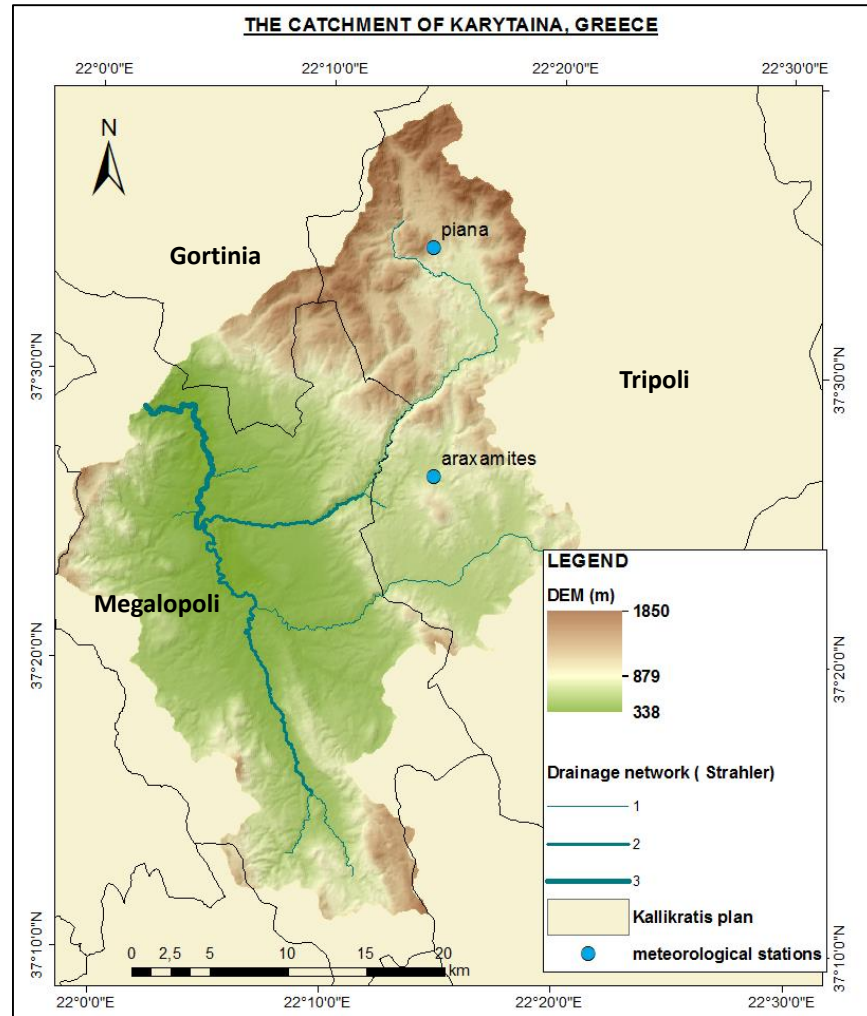


Figure 1. The catchment of Karytaina, Greece

For both the calibration and verification process, 5 different events were chosen in order to simulate the watershed hydrological response. The initial data of these events were taken by the second doctoral dissertation of E. Feloni (derivation: Public Power Corporation A.S. ‘DEI’). The data are the total rainfall (‘pcp’) and the stream stage (‘level’) (Figure 2.).

1. 21/12/2011-24/12/2011 (*Event 1*)
2. 06/01/2012-09/01/2012 (*Event 2*)
3. 03/03/2013-07/03/2013 (*Event 3*)
4. 02/03/2014-04/03/2014 (*Event 4*)
5. 05/03/2015-08/03/2015 (*Event 5*)

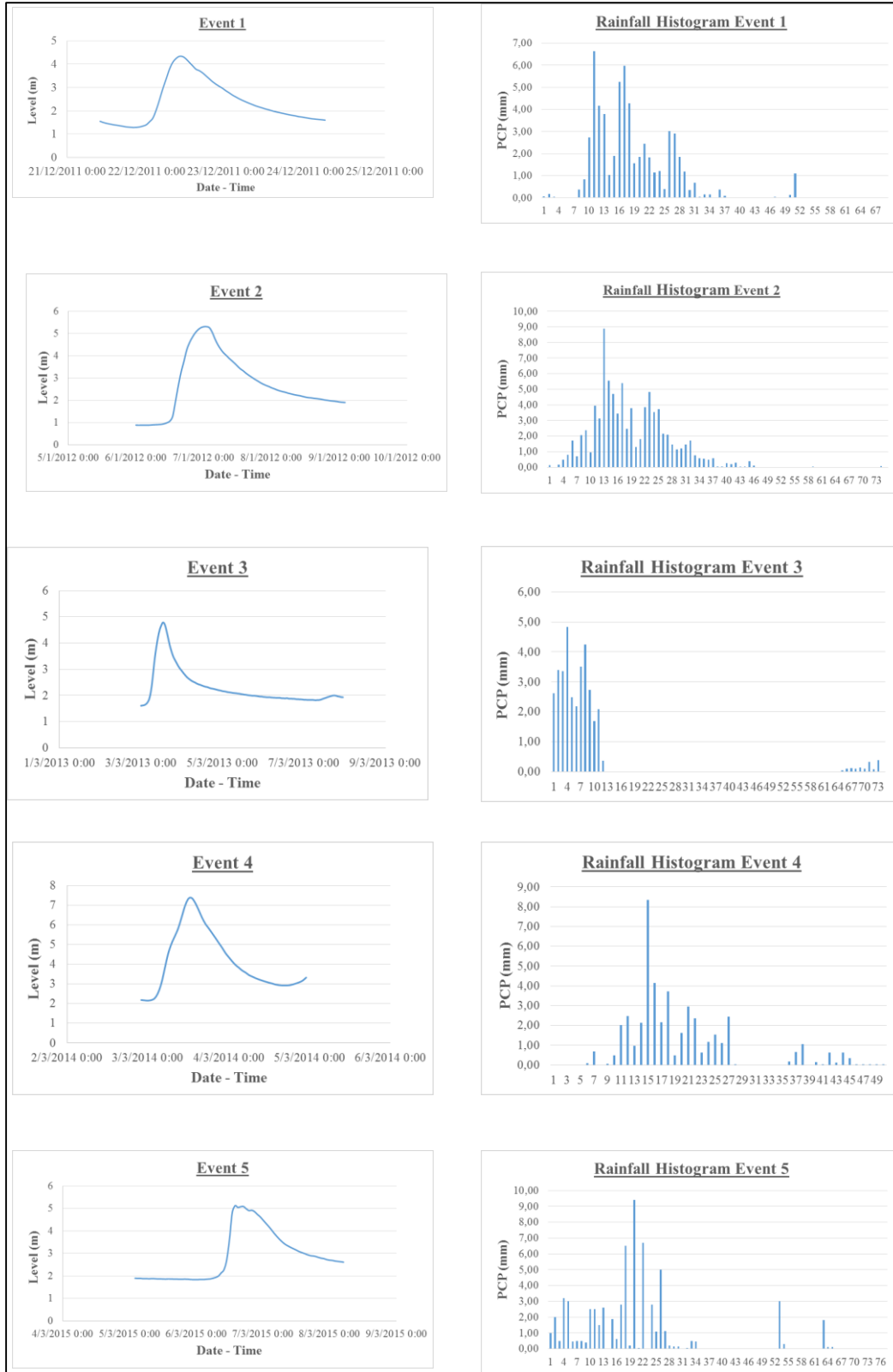


Figure 2. The initial data for the 5 events in the catchment of Karytaina

For the rainfall - runoff modeling, stream stage was transformed into discharge data by using the appropriate H – Q equation, while, for the calculation of the mean precipitation timeseries, both the Thiessen method and Phi index methods were applied. Afterwards the gis - based process for the estimation of the unit hydrograph of the basin took place.

C. Methodology

Clark’s synthetic unit hydrograph methodology takes into account the occurrence of a unit rainfall (1 mm) over the drainage basin. The technique requires the estimation of three parameters: the time of concentration (T_c), the storage attenuation coefficient (R), the time – area histogram of the basin, in order to estimate the runoff response (Anastasiadis et al., 2013).

Time of concentration

Time of concentration (T_c) is the time for a drop of water from the most hydrologically remote point in the catchment to the outlet. Due to the simplicity of parameters requirements the SCS – lag equation is selected, given by the formula:

$$T_c = \frac{T_{lag}}{0.6} \quad (1)$$

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \times \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{190 \times S^{0.5}} \quad (2)$$

where T_c is the time of concentration (in hours), L is the longest flow path of the basin (in feet), CN is the average Curve Number value of the basin (unit less), and S is the average basin slope (m/m). The longest flow path is determined using Arc Hydro tools. Catchment’s DTM has been corrected by applying the filling sinks algorithm. Then, the Flow Direction grid is calculated. Finally, the Flow Length grid is calculated. The maximum value of the longest flow path (L), in our case is 198024 feet (~ 60.36 km).

The average CN value of the basin has been determined as 80.63, according to the soil and vegetation data and the average basin slope is 10.88; obtained directly from the DTM. By inserting these values in SCS – equation (2), the resulting concentration time value for the case study is 10.82 hours.

Travel time grid

Evaluation of travel times at a grid – scale is necessary to determine the time – area histogram of the catchment .Their computation requires the travel distance for each cell (Flow Length grid). The maximum value of the Flow Length grid belongs to the remotest cell of catchment with respect to the outlet.

$$T_{tgrid} = \frac{T_c}{M_{axofCelltravellengths}} * F_{lowLengthgrid} \quad (3)$$

Storage attenuation coefficient (R)

The storage attenuation coefficient (R) reflects stream’s storage effects and usually is computed graphically from an observed storm hydrograph of the basin. The watershed storage coefficient has been selected through an iterative process by producing IUHs for several time steps i.e 5 mins, 10 mins etc.

Time – area histogram

The time – area histogram represents the area of the catchment contributing to the flow at the outlet at any given time after the application of a unit of effective rainfall. Having calculated all the parameters required in order to apply Clark’s methodology, the runoff response is estimated using the UH theory. The percentage of the total volume contributing to runoff at the outlet of the basin in each time interval is being calculated from the time – area histograms of the basin. The estimated volumes are converted to discharge for the corresponding time intervals, resulting to the estimated Instant Unit Hydrograph (IUH).

The simulated hydrograph is calculated with multiplication of IUH with the rainfall at each time. This processing followed for the 5 events of the catchment. The 3 events used for calibration process of the model and the other 2 for verification.

Calibration in measurement technology and metrology is the comparison of measurement values delivered by a device under a test with those of a calibration standard of known accuracy. Verification is the evaluation of whether or not a product, service, or system complies with a regulation, requirement, specification, or imposed condition.

In this study, 4 indices were used for the evaluation of results:

Nash – Sutcliffe model efficiency coefficient (E_f)

$$E_f = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4),$$

where x_i is observed discharge at time t , y_i is modeled discharge, \bar{x} is the mean of observed discharges.

Index PEV (percent error in volume)

$$PEV = 100 \left| \frac{V_o - V_m}{V_o} \right| \quad (5),$$

where V_o is observed volume, V_m is modeled volume.

Index PEPF (percent error in peak flow)

$$PEPF = 100 \left| \frac{Q_{o(peak)} - Q_{m(peak)}}{Q_{o(peak)}} \right| \quad (6),$$

where Q_o is the peak of observed discharge, Q_m is the peak of modeled discharge.

ΔT_{PF}

ΔT_{PF} is the percent of peak time of observed discharged with the peak time of modeled discharged.

D. Results

Calibration

The results concerning the calibration process are represented in the following Figures (3, 4, 5). The events for the calibration are the Ev.2, Ev.3 and Ev.5. The aforementioned procedure was performed in the ArcGIS 10.2 environment.

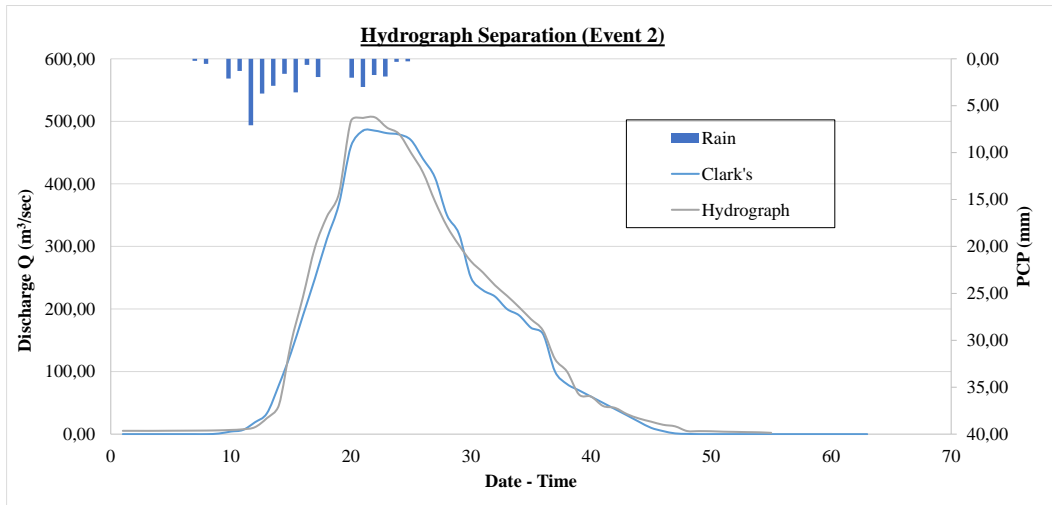


Figure 3. Hydrograph Separation of Event 2 after calibration

Table 1. Results of Event 2 after calibration

E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
0,98	5,4	3,9	30

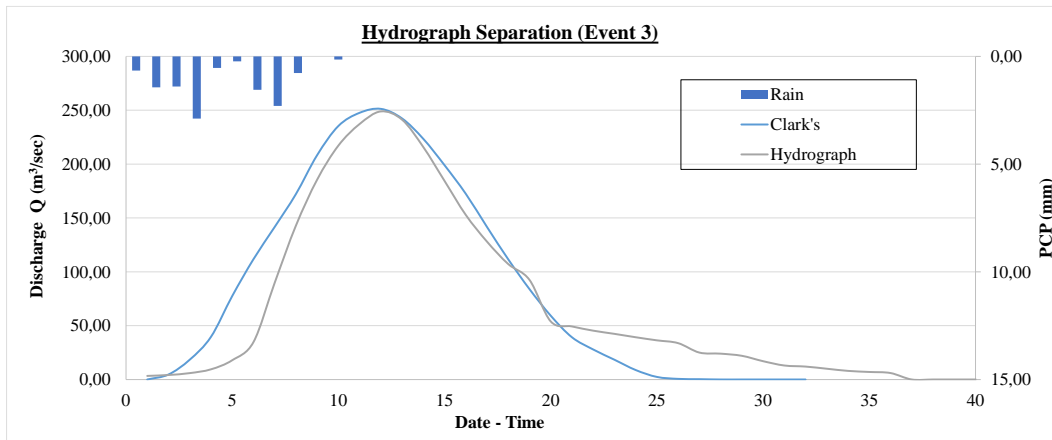


Figure 4. Hydrograph Separation Event 3 after calibration

Table 2. Results of Event 3 after calibration

E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
0,90	2,7	0,9	40

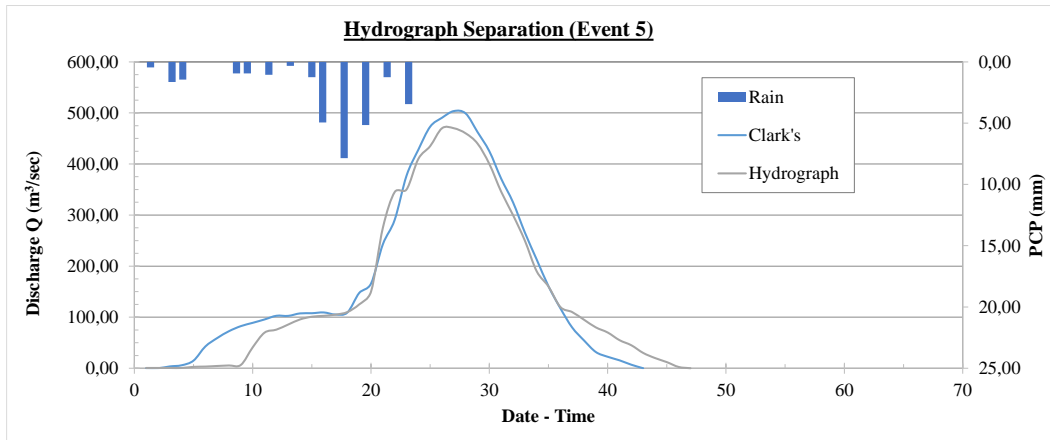


Figure 5. Hydrograph Separation Event 5 after calibration

Table 3. Results of Event 5 after calibration

E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
0,92	5,1	7,1	30

Table 4. Curve number, T_c and mean values

	CN	T_c (hours)
Event 2	80	10,82
Event 3	87	8,55
Event 5	90	7,75
Mean Value	86	9,04

The results of calibration (Table 1, 2, 3) are sufficient because the index of Nash approaches the value of 1. The closer the model efficiency is to 1, the more accurate the model is. PEV, PEPF and ΔT_{PF} are also acceptable. The results show that the modeled hydrograph is very close to the observed hydrograph (Figure 3, 4, 5).

Verification

In this study, the mean values of CN and T_c are used for the verification method. The results after the verification are represented in the following Figures (6, 7). The verification events are the Ev.1 and Ev.4.

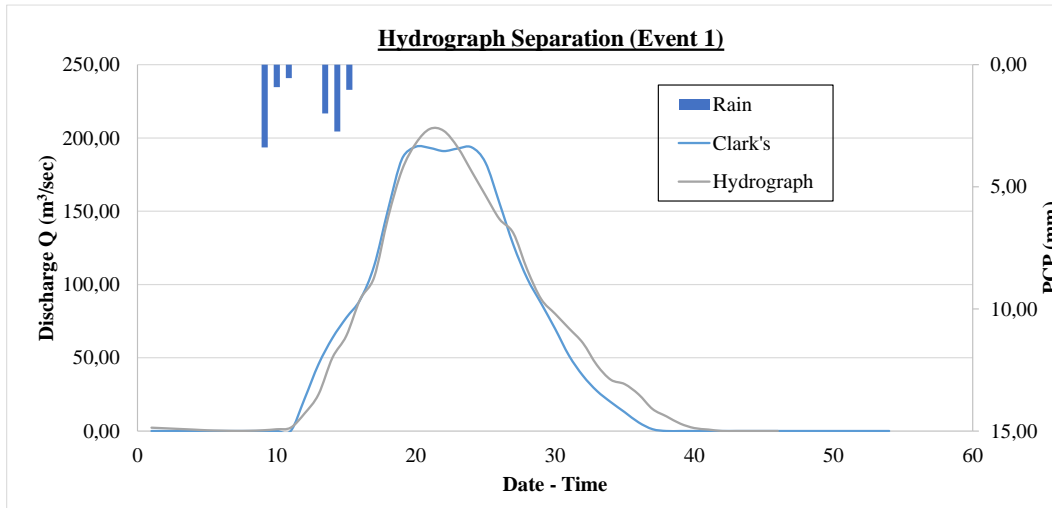


Figure 6. Hydrograph Separation Event 1 after verification

Table 5. Results of Event 1 after verification

E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
0,97	3,2	5,8	60

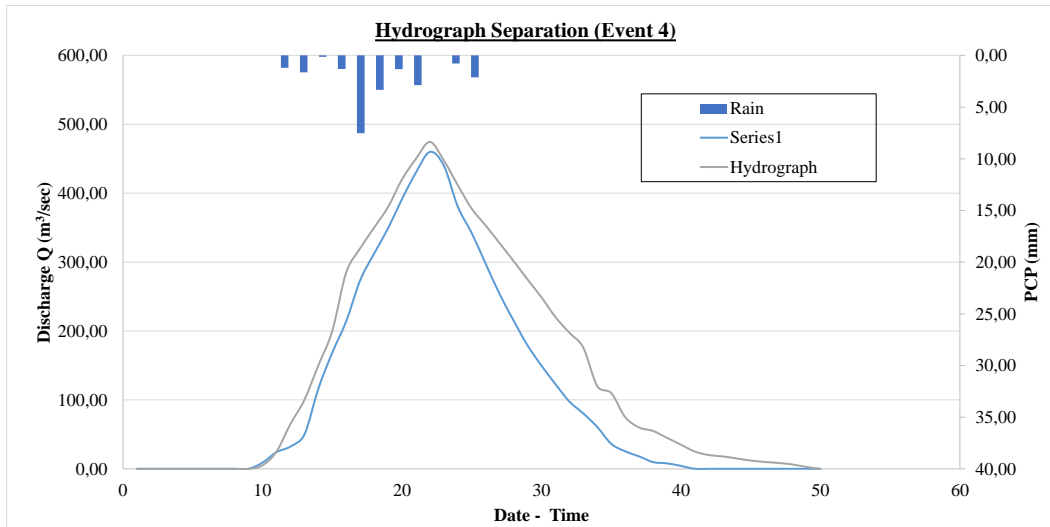


Figure 7. Hydrograph Separation Event 4 after verification

Table 6. Results of Event 4 after verification

E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
0,9	24,3	3,6	20

The results of verification are acceptable except from the price of PEV of event 4.

Overall, Synthetic Unit Hydrograph of Clark, which has been used with GIS – based technics proved very sufficient. According to the first appreciaton of value Curve Number the model had many problems for example the peak price of hydrograph. The index of calibration and verification were very good and the hydrographs figures are very similar.

E. Conclusions and Future Research

This research work presents the results from an application of the Syntetic Unit Hydrograph of Clark, with the purpose of estimating the streamflow using information extracted only from the Karytaina’s catchment characteristics. GIS-based technics were used in order to develop this model (Clark) able to simulate runoff response. Using three rainfall - runoff events, the calibration of mean Curve Number (CN) was achieved and the verification, which held by using two events, led to satisfactory results. Finally, it was found that Clark model is relatively appropriate for the examined area.

To conclude, regarding future research, the investigation can be focused on the application of another methodology for the simulation of the examined area. Further application of the Clark's method can be performed in the downstream ungauged catchment or in the same region but with a greater number of events. Another way is to simulate all the catchment of Alfeios and to find different rain stations for the model.

F. Selected references

- Anastasiadis, S., Boglis, A., Pechlivanidis, I., Lekkas, D., Baltas, E., *Application of GIS based Clark's unit hydrograph and transfer function model to describe runoff response in a small catchment, Case Study: Lykoremma river, Greece*, Fresenius Environmental Bulletin., Vol. 22., No. 7B., 2013.
- Clark, C. O., *Storage and the unit hydrograph*, Trans. Am. Soc. Civ. Engr., 110, 1945-1946.
- Nash, J., *The forms of instantaneous unit hydrograph*, Int. Ass. Sci. and Hydrology, Pub. 1, 45(3), 114-121., 1957.
- Pechlivanidis, I. G., et al. *Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications*, Global NEST journal 13.3: 193-214, 2011.
- Rodríguez-Iturbe, Ignacio, and Juan B. Valdes, *The geomorphologic structure of hydrologic response*, Water resources research 15.6: 1409-1420, 1979.
- Sherman, LeRoy K, *Streamflow from rainfall by the unit-graph method*, Eng. News Record 108: 501-505., 1932.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Μία από τις μεγαλύτερες φιλοδοξίες του ανθρώπου ήταν πάντοτε να ελέγξει τη φύση. Τα κατάφερε σε μεγάλο βαθμό σε ευρεία κλίμακα στην πανίδα και στην χλωρίδα. Δεν συνέβη, όμως το ίδιο με τα καιρικά φαινόμενα. Αυτά παραμένουν ακόμα μακριά από τον έλεγχο του ανθρώπου. Ο άνθρωπος ξέροντας αυτή του την αδυναμία, προσπάθησε να αναπτύξει τρόπους που να προβλέπουν την συμπεριφορά τους, ώστε να προφυλάσσεται από αυτά, λαμβάνοντας εγκαίρως τα απαραίτητα μέτρα. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας είναι και η δημιουργία κατασκευών που θα παραμένουν λειτουργικές και χρήσιμες, παρά τα όποια μετεωρολογικά φαινόμενα.

Ένα από τα σημαντικότερα μετεωρολογικά φαινόμενα είναι η βροχόπτωση. Η βροχόπτωση, ως μέρος του υδρολογικού κύκλου του νερού, είναι η αιτία τροφοδότησης των επιφανειακών και υπόγειων υδροφόρων οριζόντων, και κατ' επέκταση της ύδρευσης και άρδρευσης της πανίδας και της χλωρίδας αντίστοιχα άμεσα ή έμμεσα. Μετά την κατακρήμνιση το νερό ακολουθεί επιφανειακή ροή μέχρι να διηθηθεί στο υπέδαφος, και από εκεί στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, ή μέχρι να οδηγηθεί σε υδατορεύματα, όπου η κίνηση του νερού γίνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα και με μεγαλύτερες παροχές. Είναι προφανές ότι οι δραστηριότητες που χρησιμοποιούν το νερό ανέκαθεν λαμβάνουν χώρα κοντά στα ποτάμια για να εκμεταλλευτούν τις σημαντικές ποσότητες νερού που ρέουν σε αυτά. Έτσι, λοιπόν προέκυψε η ανάγκη της κατανόησης της συμπεριφοράς των ποταμών καθώς και της πρόβλεψής της. Στα πλαίσια αυτά της έρευνας αναπτύχθηκαν πολυάριθμα μοντέλα βροχής – απορροής τα οποία μετατρέπουν την βροχόπτωση σε απορροή. Κατά κύριο λόγο αναπτύχθηκαν παραμετρικά μοντέλα, τα οποία λαμβάνουν υπ' όψη τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της υπό εξέταση λεκάνης, γιατί οι στατιστικές μέθοδοι ανάλυσης απαιτούν δεδομένα πολλών ετών τα οποία στις περισσότερες περιπτώσεις δεν υπάρχουν. Σκοπός αυτών των μοντέλων είναι είτε η εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής, είτε η δημιουργία συνθετικών υδρογραφημάτων για την υπό μελέτη λεκάνη απορροής.

1.1. Υδατικοί πόροι και κατακρημνίσματα

Το νερό είναι ένας ανανεώσιμος αλλά περιορισμένος φυσικός πόρος. Σε σχέση με τους άλλους φυσικούς πόρους διαφοροποιείται στο γεγονός ότι είναι μοναδικό και αναντικατάστατο. Τα

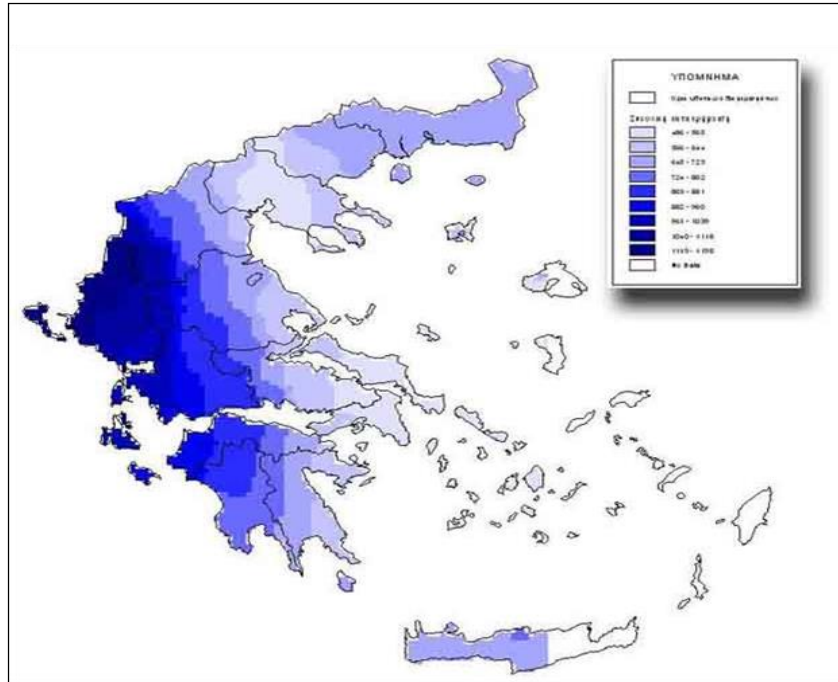
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

αποθέματα γλυκού νερού ανανεώνονται μέσω του υδρολογικού κύκλου, ωστόσο η διαθέσιμη ποσότητα νερού καθώς περνάνε τα χρόνια μειώνεται και κατανέμεται άνισα στον πλανήτη. Το νερό απαιτεί συνετή διαχείριση και όχι αλόγιστη χρήση με στόχο την ικανοποίηση πολλών αντικρουόμενων συμφερόντων. Τέλος, αποτελεί το σημαντικότερο αγαθό για την ανάπτυξη έργων ύδρευσης, αποχέτευσης, για την παραγωγή τροφίμων (άρδευση), αγαθών καθώς και για την ρύθμιση και την αποθήκευση ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

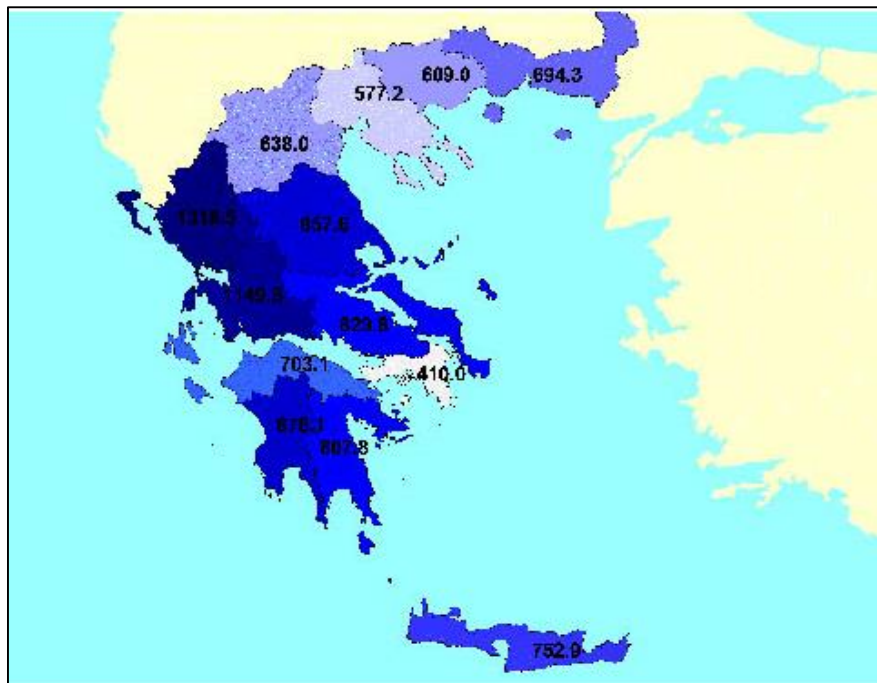
Οι υδατικοί πόροι αποτελούν εκτός από βασικό αγαθό για τη ζωή και το περιβάλλον, βασικό ρυθμιστικό παράγοντα της. Αποτελούν το σύνολο του νερού που παράγεται μέσα στην χώρα μαζί με την εξωτερική συνεισφορά νερού από τις γειτονικές χώρες. Η κατακρήμνιση αποτελεί την κύρια συνιστώσα εμπλουτισμού των επιφανειακών και υπογείων υδροφορέων. Στην χώρα μας όπως φαίνεται και στα Σχήματα 1.1., 1.2., η Δυτική Ελλάδα δέχεται το μεγαλύτερο μέρος των βροχοπτώσεων, ενώ η Ανατολική Ελλάδα με τα νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη έχουν σημαντικά μικρότερες βροχοπτώσεις (Μιμίκου, 2012).

Με τον όρο κατακρημνίσματα εννοείται κάθε μορφή υγρασίας που πέφτει από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης. Η υγρασία της ατμόσφαιρας προέρχεται κυρίως από την εξάτμιση του νερού από υγρές επιφάνειες και από τη διαπνοή. Μεγάλοι και θερμοί όγκοι νερού και εκτεταμένες εδαφικές ζώνες καλυμμένες με πλούσια βλάστηση αποτελούν άριστες πηγές εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας σε υγρασία (Παπαζαφειρίου, 1983).

Η ποσότητα των υδρατμών στην ατμόσφαιρα είναι μικρή σε σύγκριση με τις ποσότητες άλλων αερίων, αλλά σημαντική για την ανθρώπινη ζωή. Η ποσότητα των υδρατμών μεταβάλλεται στο χώρο και το χρόνο. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις των υδρατμών βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας και μειώνονται με το γεωγραφικό πλάτος, το υψόμετρο και την απόσταση από την ακτογραμμή. Περίπου το 50% της ατμοσφαιρικής υγρασίας βρίσκεται στα πρώτα 1500 m από την επιφάνεια του εδάφους (Μιμίκου, Μπαλτάς, 2012).



Σχήμα 1.1. Κατανομή συνολικής κατακρήμισης στην Ελλάδα [Πηγή: Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα, Μιμίκου, 2012]



Σχήμα 1.2. Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960-1990 ανά υδατικό διαμέρισμα [Πηγή: ΕΤΥΜΠ]

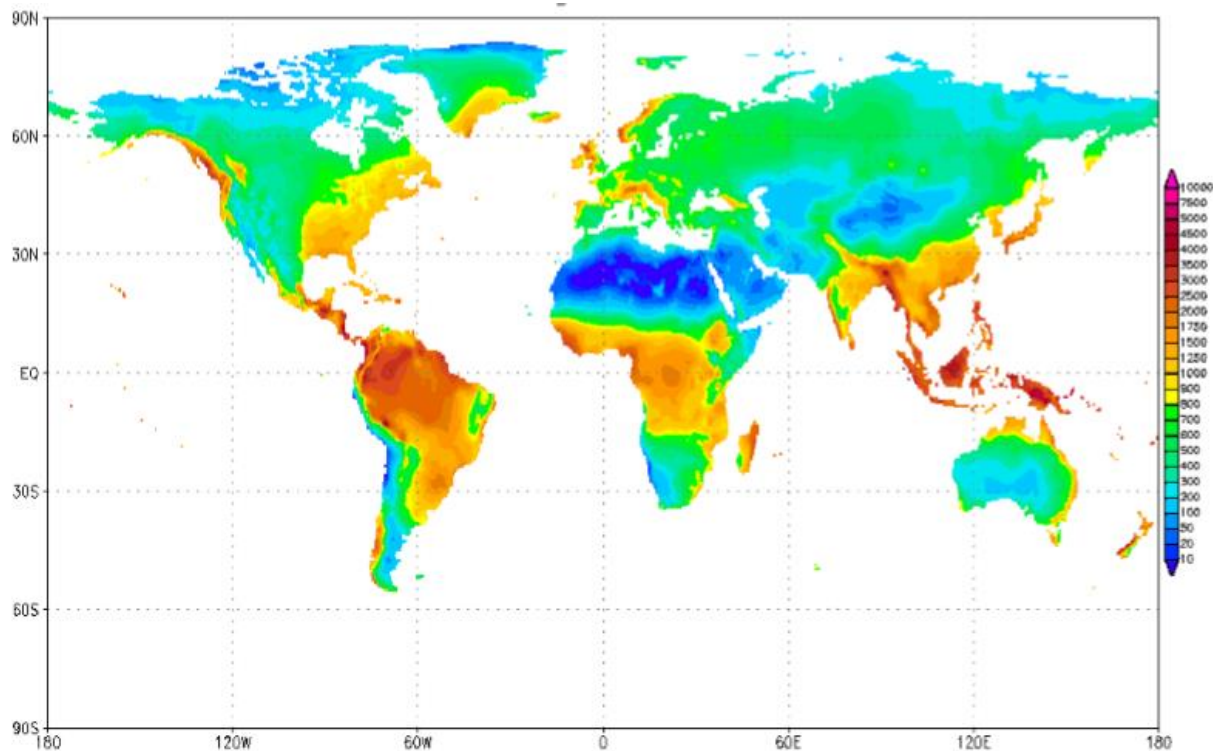
Ο μηχανισμός γένεσης της κατακρήμνισης είναι από τη φύση του πολύπλοκος. Η εξάτμιση, η ποσότητα των υδρατμών που δημιουργούνται, η μεταφορά τους από την τύρβη της ατμόσφαιρας, η συμπύκνωσή τους κάτω από ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι κάποιοι από τους παράγοντες οι οποίοι δεν επιτρέπουν στην χωροχρονική εκτίμηση της κατακρήμνισης, ως αποτέλεσμα της συμπύκνωσης των υδρατμών, να είναι συγκεκριμένη και προσδιοριστική. Η στοχαστικότητα αυτή μεταφέρεται και στις άλλες μεταβλητές του υδρολογικού κύκλου, στην απορροή, εξάτμιση κλπ, λόγω της στενής σχέσης αιτίου-αποτελέσματος που έχουν μεταξύ τους (Μπαριάμης, 2013). Μία από τις σημαντικότερες πληροφορίες στο σχεδιασμό ενός έργου είναι η ταχύτητα της επιφανειακής απορροής, η οποία δεν συνδέεται πάντα με τη στοχαστική κατακρήμνιση. Η τυχαιότητα υπάρχει και στην εκτίμηση ή μέτρηση των μεταβλητών όπου υπεισέρχονται μη συστηματικά σφάλματα. Ένα παράδειγμα είναι η εκτίμηση παροχής από δοσμένη καμπύλη στάθμης-παροχής όπου μπορεί κάποιος να προσδιορίσει την παροχή από την στάθμη του ποταμού. Άλλες ανακρίβειες προέρχονται από διάφορα τυχαία φαινόμενα όπως η κίνηση φερτών υλών μέσα σε ένα ποτάμι, η ανάπτυξη φυτών ή αλγών, οι αλλαγές στην κοίτη του ποταμού κ.α.

Από την παραπάνω ανάλυση είναι σαφές ότι η τυχαιότητα και η αιτιότητα συνυπάρχουν στις υδρολογικές μεταβλητές και διαδικασίες. Έτσι μία υδρολογική ανάλυση που δεν λαμβάνει υπ' όψιν της υδρολογικές αβεβαιότητες είναι ανακριβής. Συνεπώς, οι στοχαστικές και πιθανολογικές μέθοδοι που αντιμετωπίζουν τις υδρολογικές αυτές αβεβαιότητες είναι απαραίτητα εργαλεία για έναν σωστό υδρολογικό σχεδιασμό (Μιμίκου, 2006).

Το νερό ισοκατανέμεται άνισα στον πλανήτη όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3. δημιουργώντας πληθώρα φυσικών καταστροφών όπως οι πλημμύρες και οι ξηρασίες. Ο άνθρωπος πρέπει να φροντίσει μέσω έργων υποδομής να αντιμετωπίσει αυτά τα φαινόμενα με γνώμονα πάντα την προστασία του περιβάλλοντος και τη σωστή διαχείριση των φυσικών πόρων. Οι πλημμύρες είναι ένα καταστρεπτικό φαινόμενο το οποίο προσβάλλει τις παρόχθιες και παραποτάμιες περιοχές με οδυνηρά αποτελέσματα καθώς τίθενται σε κίνδυνο οι ζωές των ανθρώπων και διάφορες χρήσεις γης όπως αναφέρεται και παρακάτω εκτενέστερα (Καββαδά, 2012). Η Υδρολογία είναι η επιστήμη η οποία περιγράφει την εμφάνιση, την κυκλοφορία και τη διανομή του νερού της γης, καθώς και την αλληλεπίδραση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων με το περιβάλλον. Αντικείμενο της αποτελεί η από επιστημονικής άποψης εξέταση των διαφόρων φάσεων του

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

νερού, ιδιαιτέρως δε η χωρική και χρονική μεταβολή της έντασης που λαμβάνουν χώρα αυτές. Συνδέεται με ευρεία ομάδα επιστημών όπως είναι η βιολογία, η ωκεανογραφία, η μετεωρολογία, η φυσική, η ηφαιστειολογία και άλλες πολλές (Μιμίκου, Μπαλτάς, 2012).



Σχήμα 1.3. Ετήσια κατανομή βροχόπτωσης στη γη [Πηγή: www.geo.auth.gr]

1.2. Πλημμύρες

1.2.1. Πλημμύρες σε αστικές και περιαστικές περιοχές

Πλημμύρα ονομάζεται η κατάσταση κατά την οποία περιοχές, που συνήθως είναι στεγνές, καλύπτονται από ποσότητες νερού για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι πλημμυρικοί όγκοι νερού προέρχονται από:

- την τοπική βροχόπτωση
- την υπερχείλιση του ποταμού
- την εισροή της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές
- τη θραύση φράγματος

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Οι πλημμύρες προέρχονται από μετεωρολογικές καταστάσεις οι οποίες υπερχειλίζουν τα εκάστοτε έργα προστασίας λόγω του μεγάλου όγκου νερού που διοχετεύεται. Ο άνθρωπος δεν μπορεί να επέμβει στα φυσικά φαινόμενα αλλά μπορεί όμως να ενεργήσει στις λεκάνες απορροής τροποποιώντας τις εδαφικές τους συνθήκες για την αποφυγή σοβαρών καταστροφών.

Οι πλημμύρες προκαλούνται σε ένα υδατόρευμα από αύξηση της τιμής της παροχής που ξεπερνά τα φυσικά ή τεχνητά πρηνή με αποτέλεσμα την κατάκλυση των γειτονικών εκτάσεων με νερό. Η ποσοτική εκτίμηση της πλημμύρας γίνεται με βάση την παροχή αιχμής, τον πλημμυρικό όγκο, το ύψος του νερού και τέλος το εμβαδόν των εκτάσεων που κατακλύζονται. Τα μεγέθη των πλημμυρών συνδέονται με τα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης (συνολικό ύψος, ένταση, διάρκεια), της λεκάνης απορροής (έκταση, συντελεστή απορροής, χρόνο συρροής) και των υδατορευμάτων (διατομή, κλίση, ταχύτητα) (Μαμάσης, 2010).

Οι αιτίες ανεπαρκούς διοχέτευσης από το ποτάμιο σύστημα είναι η μικρή διατομή του ποταμού, η μικρή κλίση πυθμένα, μεγάλη τραχύτητα του ποταμού εξαιτίας εμποδίων στο εσωτερικό του και τέλος υψηλές στάθμες κατάντη.

Οι περιοχές που πλήττονται περισσότερο από τις πλημμύρες είναι κλειστές υδρολογικές λεκάνες σε περιοχές με καρστικά κενά που αποστραγγίζονται από καταβόθρες, πεδιάδες που αποστραγγίζονται από ποταμούς με μικρή παροχετευτικότητα και τέλος αστικές περιοχές όπου η ανθρώπινη δραστηριότητα αλλάζει τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.

Οι συνέπειες που μπορεί να προκαλέσει μία πλημμύρα εξαρτώνται από την παρουσία αντιπλημμυρικών έργων, από την ανθρώπινη παρέμβαση και από τα φυσικά χαρακτηριστικά της πληγείσας περιοχής (Μαμάσης, 2010).

Οι πλημμυρικές απορροές αποτελούν άμεσο επακόλουθο των πλημμυρών και χαρακτηρίζονται από υψηλή ένταση και η διάρκεια τους κυμαίνεται από μερικές ώρες έως μερικές μέρες. Η γνώση των πλημμυρικών απορροών είναι απαραίτητη τόσο στο σχεδιασμό όσο και στη λήψη προστατευτικών μέτρων σε υδραυλικά έργα και για αυτό έχουν ζωτική σημασία για την οικονομική και κοινωνική ζωή μιας περιοχής. Οι πλημμυρικές απορροές υπολογίζονται με την κατασκευή του υδρογραφήματος ενός ποταμού. Υδρογράφημα πλημμυρικής απορροής είναι το διάγραμμα της παροχής συναρτήσεως του χρόνου που αφορά ένα πλημμυρικό γεγονός. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι οι μετρήσεις της παροχής ανά τακτά χρονικά διαστήματα με

χρήση κατάλληλων αυτογραφικών οργάνων, τα οποία μετράνε την στάθμη όπως για παράδειγμα οι σταθμηγράφοι (Καββαδά, 2012).

1.2.2. Πλημμύρες στον κόσμο

Κάθε χρόνο οι πλημμύρες προκαλούν μεγάλες ζημιές σε ολόκληρο τον κόσμο. Η αποτύπωση όλων αυτών των ζημιών και η καταγραφή των ανθρώπινων απωλειών είναι ένα δύσκολο ζήτημα. Έχουν αναπτυχθεί μελέτες που ερευνούν τα στατιστικά στοιχεία των ανθρώπινων απωλειών για διάφορους τύπους πλημμυρών σε διαφορετικές περιοχές ανά τον κόσμο. Η βάση δεδομένων OFDA/CRED περιέχει δεδομένα για τις διεθνείς καταστροφές και διατηρείται από το Κέντρο Ερευνών το οποίο βρίσκεται στις Βρυξέλλες σε συνεργασία με τις Η.Π.Α.. Οι πληροφορίες αυτές αναφέρονται σε ένα μεγάλο αριθμό πλημμυρών, η οποίες συνέβησαν από τον Ιανουάριο 1975 έως τον Ιούνιο 2002 και αξιολογείται σε σχέση με την τοποθεσία και τον τύπο των πλημμυρών. Λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας των δεδομένων πλημμυρών στις παράκτιες περιοχές το πεδίο εφαρμογής αναφέρεται σε τρεις τύπους πλημμυρών γλυκού νερού:

- πλημμύρες ποταμών
- στιγμιαίες πλημμύρες
- προβλήματα αποχετεύσεων

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι στιγμιαίες πλημμύρες έχουν την υψηλότερη μέση θνησιμότητα και ότι δεν μεταβάλλονται με την τοποθεσία σε αντίθεση με το μέγεθος των επιπτώσεων που ποικίλλει ανάλογα με την εκάστοτε ήπειρο. Σε παγκόσμια κλίμακα οι Ασιατικοί ποταμοί προκαλούν τις μεγαλύτερες ανθρώπινες απώλειες. Τέλος, σε σύγκριση με τα στοιχεία άλλων φυσικών καταστροφών παρατηρήθηκε ότι οι πλημμύρες είναι το πιο σημαντικό φαινόμενο καταστροφών από την άποψη του αριθμού των ατόμων που επηρεάζονται (Jonkman, 2005).

1.2.3. Πλημμύρες στο Ελλαδικό χώρο

Οι πλημμύρες είναι ένα από τα σημαντικότερα φυσικά φαινόμενα καταστροφών στην νότια Ευρώπη που καταγράφει πολλά θύματα και εκτεταμένες ζημιές τον τελευταίο αιώνα. Η έντονη αστικοποίηση σε συνδυασμό με την υψηλή πυκνότητα πληθυσμού έχει αυξήσει τον κίνδυνο πλημμύρας στις περιοχές αυτές. Η Ελλάδα δεν αποτελεί εξαίρεση σε αυτό το φαινόμενο,

έχοντας μεγάλο αρχείο πλημμυρών και κατά τους αρχαίους χρόνους. Έχουν ταυτοποιηθεί 545 συμβάντα προκαλώντας 686 ανθρώπινες απώλειες και εκτεταμένες ζημιές σε ολόκληρη την χώρα. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι τα περισσότερα συμβάντα συσπειρώνονται τον μήνα Νοέμβριο και ότι υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα πλημμύρας στις αστικές περιοχές σε σχέση με τις ορεινές και τις πεδινές. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι οι πλημμύρες με το πέρασμα των χρόνων αυξάνονται σταδιακά, ενώ ο πληθυσμός της χώρας ακολουθεί τα τελευταία χρόνια σταθερή πορεία (Διακάκης κ.α., 2012).

Οι πλημμύρες στην Ελλάδα οφείλονται κυρίως στις έντονες βροχοπτώσεις. Οι περισσότερες βροχοπτώσεις παράγονται από το πέρασμα χαμηλών βαρομετρικών, τα οποία συνήθως συνοδεύονται από ψυχρά μέτωπα και καταφθάνουν από τα δυτικά, τα βορειοδυτικά και τα νοτιοδυτικά. Η μείωση των δασικών εκτάσεων λόγω πυρκαγιών τα τελευταία χρόνια στη χώρα μας καθώς και η έντονη αστικοποίηση παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση πλημμυρών, διότι αυξάνουν την πλημμυρική απορροή και μειώνουν τον χρόνο συγκέντρωσης. Οι δύο αυτοί παράγοντες είναι υπεύθυνοι για την καταστροφική δύναμη των πλημμυρικών γεγονότων.

1.2.4. Αίτια των πλημμυρών

Τα κύρια αίτια των πλημμυρών δεν μπορούν να εντοπιστούν αφού προέρχονται από φυσικά φαινόμενα (πχ. συνισταμένες του υδρολογικού κύκλου). Βασικό ερώτημα είναι κατά πόσο η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα επηρεάζει αυτές τις πλημμύρες στο σύνολό τους. Αυτά τα αίτια είναι:

- Αστικοποίηση περιοχών με κατάληψη του φυσικού περιβάλλοντος για τις ανθρώπινες δραστηριότητες συμβάλλοντας στην αυξημένη επιφανειακή απορροή.
- Αποδάσωση των ανάντη τμημάτων της λεκάνης απορροής μειώνοντας την κατακράτηση του νερού από τη βλάστηση και μειώνοντας το χρόνο για την πραγματοποίηση της διήθησης.
- Ευθυγράμμιση της ροής των ποταμών.
- Η εξάλειψη των φυσικών πεδίων κατάκλισης αφού έχουν καταληφθεί από ανθρωπογενείς δραστηριότητες οι οποίες δεν είναι προσαρμοσμένες σε γεγονότα που συμβαίνουν σπάνια ανάγοντας την από φυσικό κίνδυνο σε φυσική καταστροφή.

- Η ανεπαρκής αποστράγγιση λόγω απομείωσης διατομών από φερτές ύλες ή άλλα εμπόδια.
- Η οικοδόμηση κατασκευών και κτιρίων σε πλημμυρικά έργα.

Τα κύρια μεγέθη της πλημμύρας είναι η παροχή αιχμής και η στάθμη του υδατορεύματος που αντιστοιχεί σε αυτή, ο πλημμυρικός όγκος και η χρονική διάρκεια του φαινομένου (Μαμάσης, 2011).

1.2.5. Αντιμετώπιση των πλημμυρών στην Ελλάδα

Εξαιτίας της εμφάνισης του καταστροφικού φαινομένου των πλημμυρών κατά την διάρκεια του έτους, κυρίως την χειμερινή περίοδο κρίθηκε αναγκαία η θέσπιση συντονισμένων έργων και δράσεων πρόληψης και ετοιμότητας που θα συμβάλουν στην αντιμετώπιση αυτών. Έτσι δημιουργήθηκαν έργα, δράσεις, μέτρα πρόληψης και ετοιμότητας για την ορθή αντιμετώπιση των πλημμυρών στον Ελλαδικό χώρο τους χειμερινούς μήνες τα οποία είναι (www.civilprotection.gr):

- Σχολαστικός έλεγχος όλων των αντιπλημμυρικών έργων και η συντήρησή τους, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί η λειτουργία τους δίνοντας προτεραιότητα σε περιοχές όπου έχουν πληγεί πρόσφατα από καταστροφικές δασικές πυρκαγιές.
- Μελέτη και εκτέλεση έργων συγκράτησης των εδαφών σε δασικές εκτάσεις που η φυσική τους βλάστηση έχει προσβληθεί πρόσφατα από πυρκαγιές, (κορμοδέματα, αυλακώσεις κλπ.).
- Συνεχής έλεγχος και καθαρισμός των κοιτών των ρεμάτων για την αποκατάσταση της φυσικής ροής και για την αποφυγή τυχόν αποφράξεων.
- Σε εγκαταστάσεις Εταιριών Ύδρευσης Αποχέτευσης και κυρίως στα αντλιοστάσια και στα υδραγωγεία να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας για τον κίνδυνο των πλημμυρών.
- Στους αστικούς χώρους απομάκρυνση όλων των απορριμμάτων, φερτών υλικών, φυλλώματος, δένδρων, κλπ, τα οποία βρίσκονται σε δρόμους και κοινόχρηστους χώρους

και μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα εμφράξεων σε φρεάτια απορροής όμβριων υδάτων.

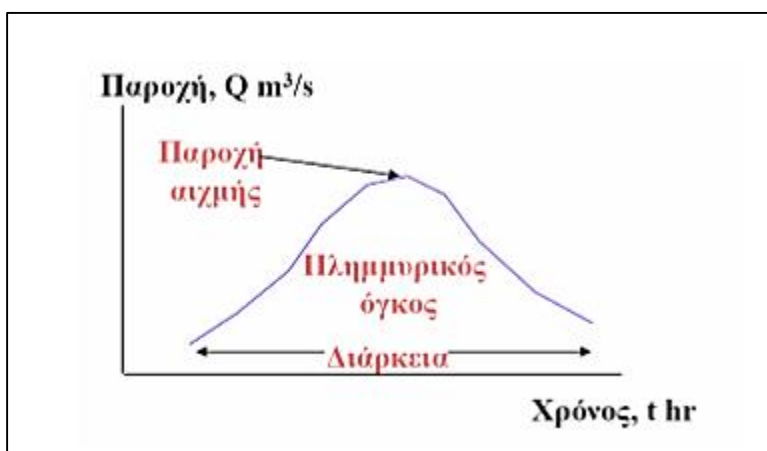
- Σε περιοχές που έχουν βεβαρμένο ιστορικό και σε περιοχές που έχουν πληγεί πρόσφατα από δασικές πυρκαγιές να πραγματοποιηθούν εργασίες, ενόψει της χειμερινής περιόδου για την αντιμετώπιση των πλημμυρών.
- Ενημέρωση του κοινού για την λήψη μέτρων προστασίας και αυτοπροστασίας από κινδύνους που προέρχονται απλο πλημμύρες, κυρίως σε περιοχές που έχουν πληγεί πρόσφατα από δασικές πυρκαγιές.
- Σύγκλιση Συντονιστικών Νομαρχιακών Οργάνων (ΣΝΟ) και Συντονιστικών Τοπικών Οργάνων (ΣΤΟ) με θέμα τη λήψη μέτρων πρόληψης και ετοιμότητας για την αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων.
- Σύγκλιση συσκέψεων υπηρεσιακών παραγόντων κατ' εντολή των Γ.Γ. Περιφερειών με την συμμετοχή όλων των επιχειρησιακά εμπλεκόμενων Δ/σεων των Περιφερειών και οικείων Νομαρχιακών Αυτοδιοικήσεων καθώς και των επιχειρησιακά εμπλεκόμενων φορέων σε επίπεδο Περιφέρειας με σκοπό τον καλύτερο συντονισμό τους σε θέματα πρόληψης, ετοιμότητας και αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών που μπορεί να προκύψουν από έντονες βροχοπτώσεις και πλημμύρες.

1.2.6. Αντιπλημμυρικά έργα

Για την υδραυλική σχεδίαση ενός αντιπλημμυρικού έργου πρέπει να γίνει η εκτίμηση μιας πλημμύρας, η οποία ονομάζεται πλημμύρα σχεδιασμού. Η έννοια της πλημμύρας σχεδιασμού εισέρχεται έτσι ώστε να σχεδιάζονται τα έργα και να είναι ασφαλή, αν εμφανιστεί πλημμύτα μικρότερης ή ίσης έντασης με αυτήν. Τα κύρια μεγέθη μιας πλημμύρας είναι τα εξής (Σχήμα 1.4.):

- η παροχή αιχμής
- ο πλημμυρικός όγκος
- η χρονική διάρκεια

Το σημαντικότερο μέγεθος από τα παραπάνω που αναφέρθηκαν είναι η τιμή της πλημμυρικής αιχμής. Με βάση την τιμή αυτή γίνεται ο σχεδιασμός των αντιπλημμυρικών έργων. Συνεπώς, για να αναφερθεί ένα υδρολογικό μοντέλο ως αξιόπιστο, πρέπει να εκτιμηθεί σωστά η τιμή της πλημμυρικής αιχμής και να ελεγχθεί στην συνέχεια η τιμή αυτή. Τις περισσότερες φορές είναι δύσκολο να βρεθεί σωστή τιμή της αιχμής αυτής, η οποία δηλαδή να προσομοιώνει σωστά το πρόβλημα αλλά έχουν βρεθεί μοντέλα που την προσεγγίζουν αρκετά. Τέλος, πολύ σημαντικός επίσης είναι και ο χρόνος εμφάνισης της πλημμυρικής αιχμής (χρόνος ανόδου ή χρόνος αιχμής) και για αυτό τον λόγο έχουν δημιουργηθεί μοντέλα που προσπαθούν να τον προσδιορίσουν.



Σχήμα 1.4. Τα κύρια μεγέθη μιας πλημμύρας [Πηγή: Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα, Μαμάσης, 2011]

1.3. Οδηγίες

1.3.1. Οδηγία 2000/60/EK

Η Οδηγία 2000/60/EK τέθηκε σε ισχύ από την Ευρωπαϊκή Ένωση για την κατανόηση της σπουδαιότητας της προστασίας και της διατήρησης του υδάτινου περιβάλλοντος. Είναι μία Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά η οποία δημιουργήθηκε από τα Κράτη Μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης στις 22 Δεκεμβρίου 2000. Η Οδηγία 2000/60/EK συνδυάζει ποιοτικούς, οικολογικούς και ποσοτικούς στόχους για την προστασία υδάτινων οικοσυστημάτων και την καλή κατάσταση όλων των υδατικών πόρων και κύρια ιδέα της είναι η ολοκληρωμένη διαχείριση αυτών στη γεωγραφική κλίμακα των Λεκανών Απορροής Ποταμών. Επίσης, επαναπροσδιορίζει την έννοια της Λεκάνης Απορροής Ποταμού, η οποία περιλαμβάνει τα εσωτερικά επιφανειακά (ποταμοί,

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

λίμνες), τα υπόγεια ύδατα, τα μεταβατικά (δέλτα, εκβολές ποταμών) και τα παράκτια οικοσυστήματα.

Για κάθε περιοχή Λεκάνης Απορροής Ποταμού καθορίζει μια σειρά από απαραίτητες ενέργειες που θα πρέπει να υλοποιηθούν εντός καθορισμένων προθεσμιών, ώστε ο βασικός στόχος της Οδηγίας που είναι η αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης όλων των υδάτων και η επίτευξη ‘καλής κατάστασης’ να επιτευχθεί μέχρι το 2015. Για την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων της Οδηγίας απαιτούνται οικονομικές αρχές και εργαλεία καθώς επίσης και ολοκληρωμένα προγράμματα μέτρων.

Συγκεκριμένα η Οδηγία Πλαίσιο περιλαμβάνει (www.eur-lex.europa.eu, www.moa.gov.cy):

- Προστασία όλων των μορφών υδάτων (εσωτερικά ύδατα, επιφανειακά ύδατα, μεταβατικά ύδατα, παράκτια και υπόγεια ύδατα).
- Επίτευξη ‘καλής κατάστασης’ ποταμών λιμνών και υπόγειων υδάτων έως το 2015.
- Αποκατάσταση των οικοσυστημάτων μέσα και γύρω από αυτά τα υδατικά συστήματα.
- Μείωση και έλεγχος της ρύπανσης στα υδατικά συστήματα.
- Διασφάλιση αειφόρου χρήσης των υδάτων για τα άτομα και τις επιχειρήσεις.
- Δημιουργία συστήματος διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού.
- Απαίτηση διασυννοριακής συνεργασίας μεταξύ των χωρών και όλων των εμπλεκόμενων μερών.
- Απαίτηση πολιτικών τιμολόγησης και εξασφαλίζει ότι ο ρυπαίνων πληρώνει.
- Εξασφάλιση συμφερόντων περιβάλλοντος με αυτά που εξαρτώνται από αυτό.

Η Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά αποτελεί μια μεγάλη προσπάθεια σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προστασία και χρήση όλων των υδάτων. Οι επιπτώσεις από την εφαρμογή της Οδηγίας στην χώρα μας αναμένεται να είναι ιδιαίτερα θετικές. Η αποτελεσματική εφαρμογή της Οδηγίας θα δημιουργήσει τις απαραίτητες συνθήκες για τη στήριξη μιας πολιτικής που θα οδηγήσει στην ικανοποιητική και αποτελεσματική προστασία καθώς και στην ορθολογική διαχείριση και αξιοποίηση των πολύτιμων υδατικών μας πόρων.

1.3.2. Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/ΕΚ για αντιπλημμυρική προστασία

Η Οδηγία 2007/60 έχει ως κύριο μέλημα να βοηθήσει τα Κράτη Μέλη στην πρόληψη, τον περιορισμό και την αντιμετώπιση των πλημμυρών. Η Οδηγία Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ συντονίζεται με αυτήν και αλληλοεπιδρούν (βέλτιστες τακτικές και διαθέσιμες τεχνολογίες) για την καλύτερη δυνατή διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας. Σύμφωνα με την Οδηγία 2007/60/ΕΚ «πλημμύρα» ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν καλύπτεται από νερό. Η πλημμύρα είναι φαινόμενο έναντι του οποίου δεν είναι δυνατή η πλήρης προστασία, δεδομένης και της κλιματικής αλλαγής. Οι εργασίες οι οποίες προβλέπονται είναι οι εξής (www.ypeka.gr) :

- Νομοθετικές, κανονιστικές διατάξεις έως 26/11/2009.
- Προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας με πρώτη υποβολή 22/12/2011 βασιζόμενη σε διαθέσιμες ή εύκολα υπολογιζόμενες πληροφορίες που περιλαμβάνει χάρτες της περιοχής λεκάνης απορροής, ιστορικά στοιχεία πλημμυρών και αξιολόγηση συνεπειών.
- Χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας με πρώτη υποβολή 22/12/2015 με επικαιροποίηση το 2019 και μετά ανά δετία. Εξετάζονται σενάρια πλημμύρας και η αντίστοιχη έκταση πλημμύρας, στάθμη, ταχύτητα νερού.
- Σχέδια διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας με πρώτη υποβολή 22/12/2015 που θέτουν στόχους διαχείρισης που δίνουν βάση στη μείωση των συνεπειών, δίνουν περίληψη των μέτρων και των προτεραιοτήτων. Πάντα θα πρέπει να γίνεται επανεξέταση και επικαιροποίηση, αξιολόγηση της προόδου λαμβάνοντας υπόψη σε όλα αυτά τα θέματα και την κλιματική αλλαγή.

Στην χώρα μας λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρατηρούνται όπως διαφορετικές λεκάνες απορροής με αυτές της υπόλοιπης Ευρώπης, έλλειψη στρατηγικού σχεδιασμού, αλλαγή χρήσεων γης και έλλειψη προσβάσιμων υδρολογικών και υδραυλικών δεδομένων κρίνεται αναγκαίο να δοθεί η δέουσα σημασία στην Οδηγία 2007/60/ΕΚ. Η Ελλάδα λόγω του εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού και την γνώση των νέων τεχνολογιών μπορεί να αξιοποιήσει αποτελεσματικά την Οδηγία και να μην αποτελεί αυτή άλλη μία υποχρέωση προς την Ε.Ε. που πρέπει να τηρηθεί. Βασικός στόχος πρέπει να είναι η αποφυγή και η επίλυση

προβλημάτων της χώρας που μερικές φορές μπορεί να γίνουν καταστροφικά για την οικονομία και το περιβάλλον και ακόμα πιο πολύ για τον άνθρωπο. Μέσα από μια πολιτική ηγεσία που έχει ως κύριο μέλημα την προστασία του πολίτη, με οργανωμένο σχέδιο και όραμα η Ελλάδα μπορεί να γίνει ισάξια άλλων χωρών της Ε.Ε. σε θέματα αντιπλημμυρικής προστασίας.

1.4. Αντικείμενο της εργασίας

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου που να προσομοιώνει την φύση είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα, με αμφίβολα αποτελέσματα. Η ανάπτυξη ενός φυσικού μοντέλου δεν μπορεί να γίνει έστω κι αν θεωρηθεί ότι υπάρχει πλήρης γνώση των φυσικών νόμων και φαινομένων που διέπουν τον υδρολογικό κύκλο, κάτι που στην πραγματικότητα δεν ισχύει καθώς δεν υπάρχει πλήρης γνώση και δυνατότητα αναπαράστασης της υφιστάμενης κατάστασης. Αντιθέτως, θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι τα διαθέσιμα δεδομένα είναι ελάχιστα έως ανεπαρκή. Συνεπώς, η ακρίβεια του μοντέλου και η επιλογή των παραδοχών που γίνονται, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στα διαθέσιμα δεδομένα (όσον αφορά την ποσότητα και ποιότητα). Η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να παρουσιάσει ένα μοντέλο βροχής – απορροής, όπου να προσομοιώνει μεμονωμένα υδρολογικά γεγονότα, αξιοποιώντας τα δεδομένα που αφορούν στα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Κύριος στόχος είναι ο υπολογισμός της απορροής πέντε επεισοδίων βροχής της τελευταίας πενταετίας μέσω της δημιουργίας του αντίστοιχου πλημμυρογραφήματος.

Αναλυτικότερα, προσδιορίζει το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας της λεκάνης απορροής, από το οποίο προκύπτει ένα Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα της λεκάνης. Η όλη διαδικασία προσδιορισμού του ιστογράμματος χρόνου – επιφάνειας γίνεται σε περιβάλλον GIS. Έχοντας γνωστό το ΜΥΓ της λεκάνης, όπως αυτό προέκυψε κατόπιν γεωμορφολογικής ανάλυσης της περιοχής σε περιβάλλον GIS, και την καθαρή βροχή (‘η αλλιώς «ενεργό» βροχή) μπορεί να υπολογιστεί το καθαρό πλημμυρογράφημα και να συγκριθεί με το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα.

Για τον σκοπό αυτό, επιλέχθηκαν 5 επεισόδια βροχής απορροής τα οποία και αξιοποιήθηκαν για το στάδιο ρύθμισης και αξιολόγησης του μοντέλου.

1.5. Διάρθρωση της εργασίας

Στο 1^ο Κεφάλαιο αναφέρθηκαν γενικά στοιχεία γύρω από τους υδατικούς πόρους, τις πλημμύρες και των Οδηγιών του νερού. Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τρόποι με τους οποίους τα Σ.Γ.Π. αναλύουν υδρολογικά την λεκάνη απορροής (μέσω παραδειγμάτων) καθώς επίσης και θεωρητικά στοιχεία των υδρολογικών μοντέλων και των Υδρογραφημάτων. Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η λεκάνη απορροής του ποταμού Αλφειού, η υπολεκάνη στην περιοχή της Καρύταινας για την οποία εφαρμόστηκε το μοντέλο βροχής – απορροής, και το δίκτυο των διαθέσιμων σταθμών καταγραφής. Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού του παρατηρημένου και του προσομοιωμένου πλημμυρογραφήματος. Στο 5^ο Κεφάλαιο περιγράφεται η βαθμονόμηση και η επαλήθευση του μοντέλου. Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

1.6. Κατάλογος λογισμικού εργασίας

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει τα ακόλουθα προγράμματα Η/Υ:

- Microsoft Office 2013 (Excel, Word, Powerpoint)
- ArcGis 10.2 (Geographic Information System), πρόγραμμα επεξεργασίας και διαχείρισης Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, κατασκευής της Environmental Systems Research Institute Inc (ESRI)
- Google Earth, πρόγραμμα γραφικής απεικόνισης της Γης
- Autocad 2013, σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD

Κεφάλαιο 2. Υδρολογική Ανάλυση σε Σ.Γ.Π. (GIS)

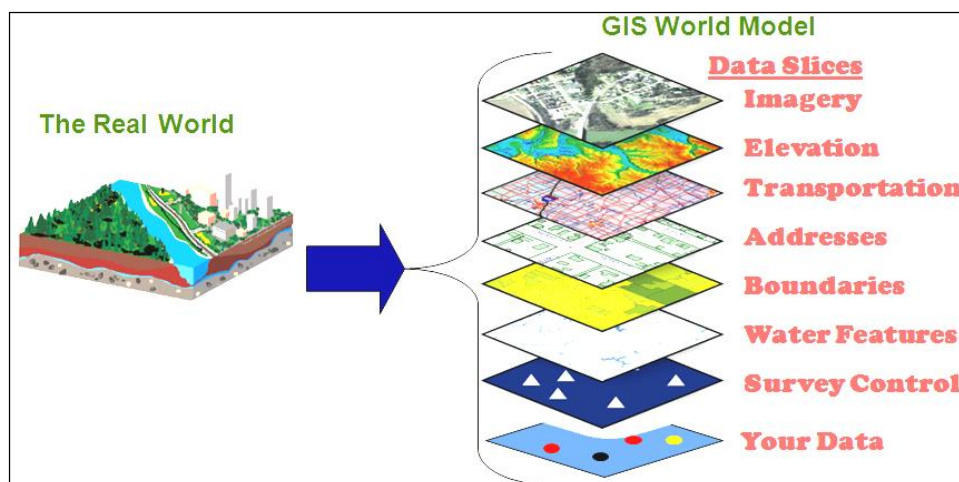
2.1. Γενικές πληροφορίες των Σ.Γ.Π.

Η αντίληψη του χώρου δεν είναι κάτι στατικό αλλά αλλάζει και μεταμορφώνεται ανάλογα με το κοινωνικό, πολιτικό, οικονομικό και τεχνολογικό περιβάλλον. Έτσι τόσο ο χωρικός σχεδιασμός όσο οι μέθοδοι ανάλυσης και διαχείρισης των χωρικών στοιχείων εξελίσσονται και μεταλλάσσονται στο χώρο. Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) είναι το βασικό εργαλείο για την αντίληψη της σχέσης ανάμεσα στον χωρικό σχεδιασμό και τα συστήματα πληροφοριών. Τα GIS θεωρούνται ένα από τα πιο υποσχόμενα συστήματα πληροφοριών που κυκλοφορούν σήμερα. Ο λόγος είναι ότι μπορούν να συνδυάσουν δεδομένα με χωρική πληροφορία, επιτρέποντας στον χρήστη να δημιουργεί πληρέστερες βάσεις δεδομένων τις οποίες χρησιμοποιεί για την αποτελεσματικότερη λήψη αποφάσεων. (Καββαδά, 2012).

Τα Σ.Γ.Π. εφαρμόζονται για χωρικά δεδομένα μέσω της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών αποτελώντας ολοκληρωμένα συστήματα καθιστώντας τα στην παγκόσμια κλίμακα ως επιστήμη λόγω της μεγάλης διάδοσής τους. Τα τελευταία 30 χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλη θεωρητική και τεχνολογική ανάπτυξη του GIS επειδή χαρακτηρίζεται από ποικίλες εφαρμογές. Ενσωματώνουν διαφορετικές ιδέες σε περιοχές με θεματολογία γύρω από τους υπολογιστές, την γεωργία, τα οικονομικά, τα μαθηματικά, την χωροθέτηση και φυσικά την γεωλογία (Maguire, 1991).

Τα Σ.Γ.Π. είναι πληροφοριακά συστήματα (Information Systems) που παρέχουν τη δυνατότητα συλλογής, διαχείρισης, αποθήκευσης, επεξεργασίας, ανάλυσης και οπτικοποίησης σε ψηφιακό περιβάλλον, των δεδομένων που σχετίζονται με το χώρο. Τα δεδομένα συνήθως λέγονται χαρτογραφικά ή γεωγραφικά ή χωρικά (spatial) και μπορεί να σχετίζονται με μια σειρά από περιγραφικά δεδομένα τα οποία και τα χαρακτηρίζουν μοναδικά. Στο Σχήμα 2.1. φαίνεται η αρχή της υπέρθεσης των Πληροφοριακών επιπέδων στο GIS δίνοντας αναλυτικά τα διάφορα βήματα που εκτελούνται ηλεκτρονικά. Κάθε γεωγραφικό στοιχείο προσδιορίζεται από δύο κατηγορίες χαρακτηριστικών παραμέτρων, οι οποίες είναι:

- Χωρική πληροφορία
- Περιγραφική πληροφορία



Σχήμα 2.1. Η αρχή της υπέρθεσης των Πληροφοριακών επιπέδων στο GIS [Πηγή: www.in.gov]

2.2. Διανυσματικά και Ψηφιδωτά Μοντέλα

Καθώς ο βασικός στόχος ενός Σ.Γ.Π. είναι η μετατροπή ακατέργαστων δεδομένων (data) σε πληροφορίες (information) θα πρέπει να υποστηρίζονται τα κατάλληλα μοντέλα αναπαράστασης των γεωγραφικών δεδομένων. Οι δύο βασικοί τύποι των μοντέλων είναι το διανυσματικό μοντέλο (vector) και το ψηφιδωτό μοντέλο ή μοντέλο κανάβου (raster).

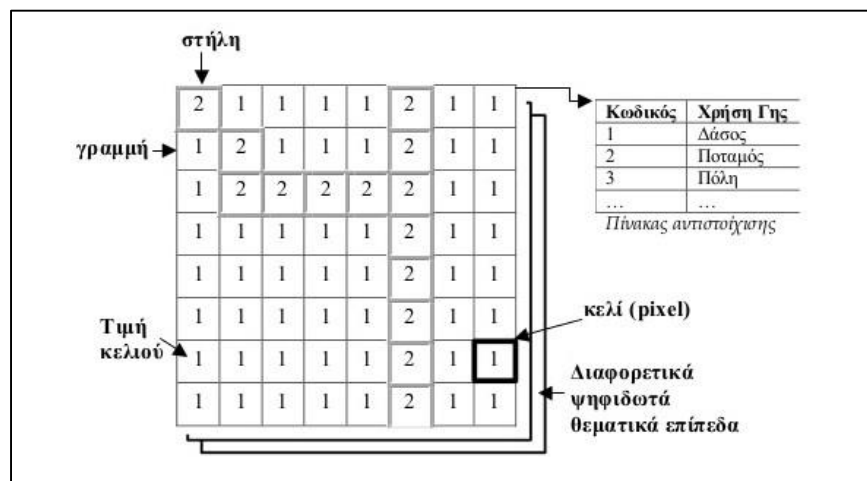
➤ Διανυσματικό μοντέλο (vector)

Σύμφωνα με τη βασική αρχή του διανυσματικού μοντέλου ο πραγματικός κόσμος ο επιμέρους κόσμος μπορεί να επιμεριστεί σε διακριτά γεωγραφικά αντικείμενα τα οποία ορίζονται με σαφήνεια και έχουν την μορφή σημείων, γραμμών ή πολυγώνων (επιφανειών). Η χωρική διάσταση αυτών αντικειμένων προσδιορίζεται με τη χρήση συντεταγμένων. Έτσι, κάθε σημείο της επιφάνεια της γης αντιστοιχεί μοναδικά με ένα ζεύγος (ή τριάδα) αριθμών σε ένα σύστημα συντεταγμένων όπως είναι οι x, y και z Καρτεσιανές συντεταγμένες.

Οι τρεις παραπάνω τύποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση γεωγραφικών οντοτήτων. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά ώστε να δομούν σύνθετα χωρικά στοιχεία. Η χωρική βάση ενός Σ.Γ.Π. συχνά αποτελείται από θεματικά επίπεδα διανυσματικών δεδομένων. Η μοντελοποίηση των χωρικών δεδομένων σύμφωνα με το διανυσματικό μοντέλο βασίζεται σε μία οπτική ανάλυση του πραγματικού κόσμου σε αντικείμενα ή διακριτές οντότητες.

➤ Ψηφιδωτό μοντέλο (raster)

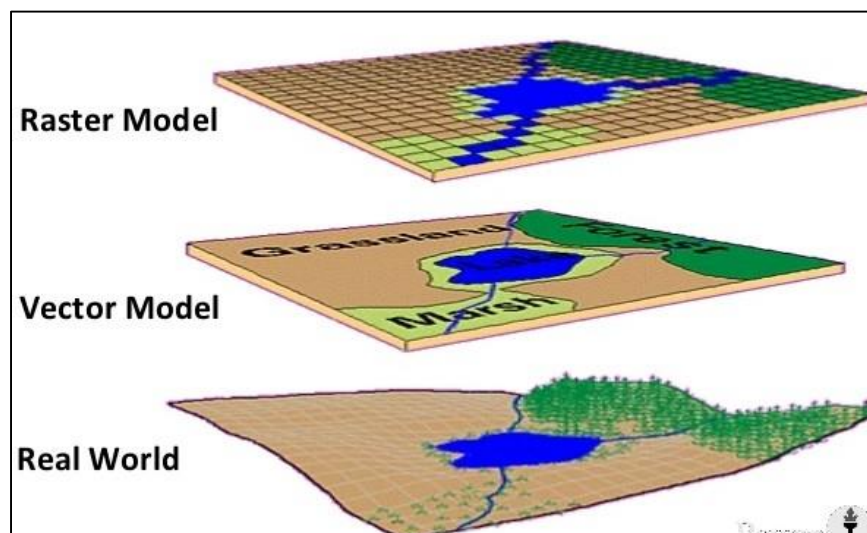
Η αναπαράσταση γεωγραφικών δεδομένων με το ψηφιδωτό μοντέλο βασίζεται στην εξέταση καθορισμένων περιοχών του πραγματικού κόσμου. Σύμφωνα με αυτή, ο χώρος διαιρείται σε διατεταγμένα δομικά στοιχεία τα οποία κατασκευάζουν πλέγματα. Τα δομικά αυτά στοιχεία καλούνται ψηφίδες ή κελιά (pixels, cells) και είναι συνήθως τετράγωνα (Σχήμα 2.2.). Η θέση μιας ψηφίδας καθορίζεται από τη στήλη και τη γραμμή στην οποία ανήκει, ενώ η έκταση στην οποία αντιπροσωπεύει κάθε ψηφίδα καθορίζει τη χωρική ανάλυση των δεδομένων. Η τοποθέτηση ενός γεωγραφικού στοιχείου καταγράφεται στην πλησιέστερη ψηφίδα. Για κάθε ψηφίδα αποθηκεύονται περιγραφές οι οποίες δείχνουν τον τύπο του γεωγραφικού αντικειμένου. Διαφορετικές περιγραφές που αναφέρονται στο ίδιο κελί αποθηκεύονται σε ξεχωριστά θεματικά επίπεδα.



Σχήμα 2.2. Ψηφιδωτό μοντέλο [Πηγή: Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα, Χαλκιάς, 2006]

Παρά το γεγονός ότι το διανυσματικό και το ψηφιδωτό μοντέλο διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο οργάνωσης και δόμησης της χωρικής πληροφορίας, καθώς και το ότι χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνολογίες εισόδου δεδομένων, οι τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις επιτρέπουν συνδυασμένη χρήση αυτών των δύο μοντέλων σε γεωγραφικές εφαρμογές. Έτσι, τα σύγχρονα συστήματα παρέχουν δυνατότητες μετατροπής από ψηφιδωτά σε διανυσματικά δεδομένα. Στις μέρες μας το διανυσματικό και το ψηφιδωτό μοντέλο χρησιμοποιούνται από κοινού συμπληρωματικά και όχι ανταγωνιστικά, διαδραματίζοντας εξίσου σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες επεξεργασίας και ανάλυσης των γεωγραφικών δεδομένων (Χαλκιάς, 2006). Τέλος,

και τα δύο μοντέλα είναι αξιόπιστα και λειτουργικά, ενώ σε πολλές περιπτώσεις είναι μετατρέψιμο το ένα στο άλλο. Η υδρολογική ανάλυση στα Σ.Γ.Π. χρησιμοποιεί ως βάση της κανονικοποιημένα μοντέλα για να μπορέσει να προσομοιώνει την κίνηση της κάθε σταγόνας πάνω στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Στο Σχήμα 2.3. φαίνονται οι διαφορές των δύο μοντέλων με τον πραγματικό κόσμο.



Σχήμα 2.3. Αναπαράσταση ψηφιδωτού, διανυσματικού μοντέλου και πραγματικού κόσμου

[Πηγή: *Introducing GIS and Remote Sensing*, Rowan University, 2011]

2.3. Υδρολογικά μοντέλα σε Σ.Γ.Π.

Ως υδρολογικό μοντέλο ορίζονται οι μαθηματικοί μετασχηματισμοί που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου (υδρολογικά, γεωμορφολογικά κτλ.) και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους μηχανισμούς του υδρολογικού κύκλου, με σκοπό την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών σε κατάλληλη χωρική και χρονική κλίμακα (Ευστρατιάδης, Μαμάσης, 2010). Αυτά τα δεδομένα είναι αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο.

Ένα υδρολογικό μοντέλο βασίζεται στην προσομοίωση της βροχόπτωσης και την επίδραση της απορροής στην συγκέντρωση των επιφανειακών υδάτων. Τα υδρολογικά μοντέλα συνδυάζουν πολλά επιμέρους θεματικά πεδία όπως τοπογραφικά, γεωμορφολογικά, εδαφολογικά και επίπεδα χρήσεων γης τα οποία απαιτούν εξειδικευμένο λογισμικό για την καλύτερη διαχείρισή τους.

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι κατάλληλα για την εφαρμογή υδρολογικών μοντέλων καθώς έχουν ως βασικό πλεονέκτημα την οργάνωση και επεξεργασία των δεδομένων

Κεφάλαιο 2. Υδρολογική Ανάλυση σε Σ.Γ.Π. (GIS)

για τη δημιουργία τοπολογικών σχέσεων αναφορικά με τον γεωγραφικό χώρο. Στις μέρες μας λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της υπολογιστικής δύναμης, δόθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης πολύπλοκων υδρολογικών μοντέλων, τα οποία εκτελούνται κυρίως από τα Σ.Γ.Π., λόγω του μεγάλου όγκου δεδομένων που μπορούν να διαχειριστούν. Τα Σ.Γ.Π. παρέχουν τη δυνατότητα της χωρικής ανάλυσης γεγονός που προσφέρει τον πλήρη έλεγχο των διεργασιών και των αποτελεσμάτων των υδρολογικών εφαρμογών αλλά και την οπτικοποίηση τους για την καλύτερη κατανόησή τους από τον χρήστη. Τα κύριο στοιχεία της υδρολογικής ανάλυσης είναι το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους από το οποίο εισάγονται πληροφορίες για το ανάγλυφο και τα τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής αλλά και για την κίνηση των υδάτων. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους είναι η κάθε κάθε ψηφιακή αναπαράσταση της συνεχούς μεταβολής του αναγλύφου στο χώρο. Μπορεί να ονομαστεί και DEM, αλλά είναι πιο ειδικός όρος και αναφέρεται μόνο στην ψηφιακή αναπαράσταση του αναγλύφου. Για τους παραπάνω λόγους τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους και τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι η βάση για τις υδρολογικές εφαρμογές (Burrough, 1986, Fairfield and Laymarie, 1991, Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993).

Για παράδειγμα, ένα χωρικά κατανεμημένο υδρολογικό μοντέλο παρουσιάζεται για την προσομοίωση της απορροής σε μια λεκάνη απορροής. Η απορροή ενεργοποιείται από την ένταση της βροχής, από την υγρασία του εδάφους και υπολογίζεται ένας συντελεστής απορροής, ο οποίος εξαρτάται από την κλίση, τη χρήση γης και τον τύπο του εδάφους. Η απορροή δρομολογείται μέσω της λεκάνης απορροής κατά μήκος διαδρομών ροής και καθορίζεται από την τοπογραφία χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο μεταφοράς κύματος, που δίνει την δυνατότητα να υπολογιστούν οι λειτουργίες απόκρισης από ένα οποιοδήποτε σημείο έναρξης και λήξης. Όλοι αυτοί οι υπολογισμοί μπορούν να υπολογιστούν με το GIS.

Λόγω της πολυπλοκότητας των υδρολογικών διαδικασιών και των χαρακτηριστικών της λεκάνης όλο και περισσότερα μοντέλα που χρησιμοποιούν GIS λαμβάνουν χώρα. Για παράδειγμα, οι Naden και Troch χρησιμοποίησαν χωρικά κατανεμημένα υδρολογικά μοντέλα βροχής-απορροής συμπεριλαμβανομένης της ροής σε πλαγιά και σε κανάλι. Ο Muzik παρουσίασε μία μέθοδο για επιφανειακή απορροή χρησιμοποιώντας τεχνικές GIS για τον προσδιορισμό Μοναδιαίου Υδρογραφήματος. Ο Schumman εφάρμοσε ένα δισδιάστατο στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα σε ένα πλαίσιο GIS. Ο Maidment παρουσίασε ένα

πολύπλοκο δίκτυο με βάση ένα μοντέλο στο οποίο το χωρικά καταναμημένο υδρογράφημα προσδιορίστηκε από την ταχύτητα της ροής. Τέλος, ο Olivera πρότεινε μία μέθοδο για την δρομολόγηση χωρικά καταναμημένα κατακρημνίσματα σε μία καμπή χρησιμοποιώντας ψηφιακά μοντέλα (De Smedt et al., 2000).

2.4. Κατηγορίες Υδρολογικών μοντέλων

Τα υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται με βάση τη χωρική κλίμακα, τη χρονική κλίμακα, την στοχαστική ή όχι δομή των μεταβλητών του μοντέλου και το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών. Οι κατηγορίες είναι οι εξής (Χριστοφίδης, 2008):

Χωρική κλίμακα

- Αδιαμέριστη ή συγκεντρωτική: Ολόκληρη η λεκάνη αποτελεί μία ενιαία χωρική οντότητα και οι χρονοσειρές ολοκληρώνονται σε όλη την επιφάνεια της λεκάνης, για την οποία θεωρούνται ενιαίες τιμές παραμέτρων. Η εκτίμηση της απορροής γίνεται στην έξοδο της λεκάνης.
- Ημικαταναμημένη: Η λεκάνη χωρίζεται σε μικρότερες διακριτές περιοχές, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούν διαφορετικές παράμετροι και διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης. Οι υπολογισμοί γίνονται για κάθε ενότητα ξεχωριστά και η απόκριση της κάθε ενότητας μεταφέρεται στην έξοδο της λεκάνης.
- Ημι-αδιαμέριστη: Είναι μία ενδιάμεση κατάσταση των προηγούμενων δύο κατηγοριών, όπου θεωρούνται μικρότερες διακριτές περιοχές αλλά ενώ οι φορτίσεις εφαρμόζονται για κάθε ενότητα χωριστά, οι παράμετροι είναι κοινές για το σύνολο της λεκάνης.
- Καταναμημένη: Το φυσικό σύστημα σε μικρής κλίμακας χωρικές ενότητες που καλούνται κύτταρα. Προκύπτουν είτε από την εφαρμογή ενός ορθογωνικού κανάβου δεδομένης ισοδιάστασης, είτε έχουν ακανόνιστο γεωμετρικό σχήμα. Τα κύτταρα αντιπροσωπεύουν ομοιογενή και ισότροπα εδαφικά τμήματα, στα οποία αντιστοιχούν διαφορετικές χρονοσειρές φόρτισης και διαφορετικές τιμές παραμέτρων.

Χρονική κλίμακα

- Μεμονωμένο υδρολογικό γεγονός: Τα μοντέλα αυτά περιγράφουν μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή της πλημμύρας.
- Συνεχή: Περιγράφουν την διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας.

Στοχαστική δομή των μεταβλητών του μοντέλου

- Στοχαστικά: Μια τουλάχιστον μεταβλητή έχει στοχαστική δομή. Λαμβάνονται υπ' όψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μεταβλητών.
- Προσδιοριστικά: Δίνουν σαφή δομή και μονοσήμαντα αποτελέσματα και δεν υπάρχει καμία στοχαστική δομή των δεδομένων. Μειονέκτημά τους είναι ότι δεν μπορούν να δώσουν πιθανοτική διάσταση στα αποτελέσματα.

Βαθμός προσέγγισης των φυσικών διεργασιών

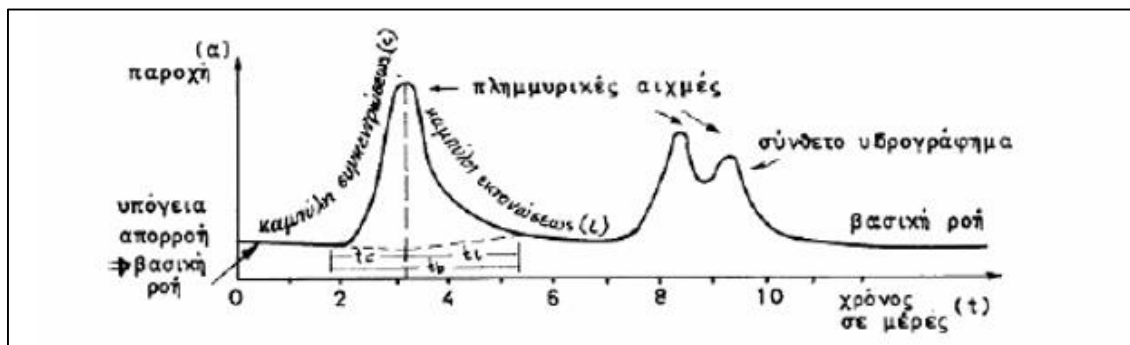
- Μοντέλα φυσικής βάσης: Χρησιμοποιούν εξισώσεις μικροκλίμακας που διέπουν το φυσικό φαινόμενο. Είναι θεωρητικά πλήρη σε πολύ μικρή χωρικά κλίμακα αλλά παρουσιάζουν αδυναμίες στις μεγαλύτερες. Επίσης, παρουσιάζουν αδυναμία σε σχέση με άλλα, θεωρητικά λιγότερο πλήρη μοντέλα, λόγω της απαίτησής τους για μεγάλο όγκο δυσεύρετων δεδομένων καθώς πολλές μεταβλητές που περιέχουν απαιτούν δεδομένα που είναι αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο.
- Εννοιολογικά μοντέλα: Προσομοιώνουν τις κύριες διαδικασίες του φυσικού φαινομένου βασιζόμενα σε απλουστευμένες παραδοχές.
- Εμπειρικά ή μαύρου κουτιού: Χρησιμοποιούν εξισώσεις χωρίς φυσική σημασία με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καμία φυσική συνέπεια.

2.4. Υδρογραφήματα

2.4.1. Υδρογράφημα απορροής

Το διάγραμμα της παροχής σαν συνάρτηση του χρόνου σε ένα ορισμένο σημείο της κοίτης ενός υδατορεύματος $Q=Q(t)$ καλείται Υδρογράφημα και έχει τα γενικά χαρακτηριστικά που

φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 2.4. Το νερό που ρέει στα υδατορεύματα, προέρχεται από πηγές που έχουν σχετικά σταθερή παροχή στην διάρκεια του χρόνου (υπόγεια ή βασική ροή) και από την άμεση απορροή που οφείλεται στην βροχή. Εάν έχουμε μία περίοδο χωρίς βροχή, η παροχή είναι σχετικά σταθερή, αυξάνει όμως απότομα μετά από έντονες βροχοπτώσεις ή καταιγίδες, δημιουργώντας πλημμυρικές αιχμές, δηλαδή μικρές χρονικές περιόδους με απότομη αύξηση και κατόπιν μείωση της παροχής.



Σχήμα 2.4. Το Υδρογράφημα και τα χαρακτηριστικά του [Πηγή: www.auth.gr]

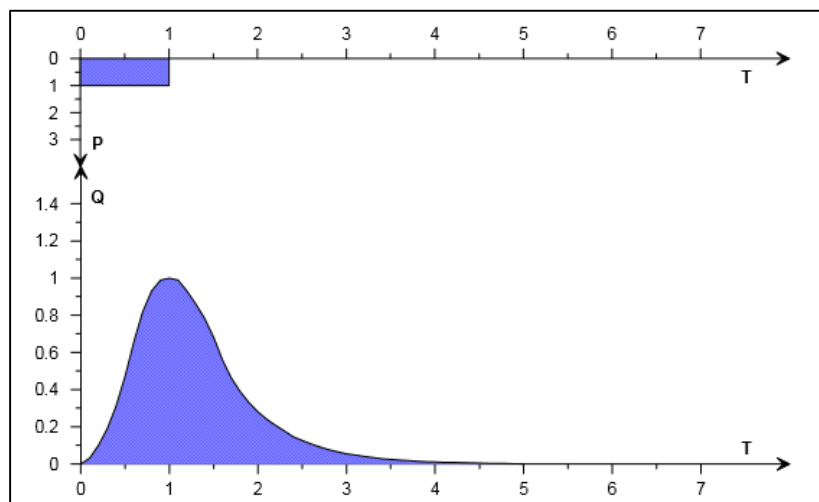
Οι πλημμυρικές αιχμές αντιστοιχούν σε παροχή πολλές φορές μεγαλύτερη από την βασική ροή του ποταμού και μπορούν να δημιουργήσουν υπερχειλίσεις και πλημμύρα. Η ταχεία αυτή αυξομειώση της παροχής, που καταγράφεται στα αντίστοιχα πλημμυρικά Υδρογραφήματα, μεταδίδεται από τα ανάντη προς τα κατόντη με την μορφή κύματος.

Ένα πρώτο μέλημα του Πολιτικού Μηχανικού, στα πλαίσια της αντιπλημμυρικής προστασίας, είναι ο προσδιορισμός του Υδρογραφήματος που θα προκύψει από την βροχή ή την καταιγίδα σε μια περιοχή που τροφοδοτεί ένα υδατόρευμα, την λεκάνη απορροής. Η μέγιστη παροχή αλλά και το Υδρογράφημα που προσδιορίζει το πώς θα αρχίσει να αυξάνει την παροχή, καθώς θα συγκεντρώνονται στο υδατόρευμα όλο και μεγαλύτερες ποσότητες νερού (καμπύλη συγκεντρώσεως), σε πόσο χρόνο θα φτάσει το μέγιστο της παροχής (χρόνος συγκεντρώσεως), με ποιο ρυθμό θα εκτονωθεί η παροχή αυτή (καμπύλη εκτονώσεως) και σε πόσο χρόνο θα αποκατασταθεί η πραγματική ροή (βασική ροή) στο υδατόρευμα (χρόνος εκτονώσεως), εξαρτώνται τόσο από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής, όσο και από την διάρκεια και ένταση της βροχής. Η καταγραφή σε διάγραμμα της μεταβολής της βροχής στον χρόνο $P=P(t)$ ονομάζεται υετόγραμμα.

2.4.2. Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Η αρχή του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Sherman το 1932. Κατά τον Sherman, Μοναδιαίο Υδρογράφημα είναι το Υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους ίσου με τη μονάδα (στο μετρικό σύστημα ίσης με ένα cm), που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σ'όλη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και έχει ομοιόμορφη ένταση. Δηλαδή το Μοναδιαίο Υδρογράφημα είναι ένα Υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή ίση με 10 mm συγκεκριμένης διάρκειας. Τα υδρογραφήματα που προέρχονται από βροχές πολλαπλάσιας εντάσεως ή/και διάρκειας, καθώς και αυτά που προέρχονται από σύνθετες μορφές βροχής μπορούν να υπολογιστούν από το Μοναδιαίο Υδρογράφημα, εφαρμόζοντας τις αρχές α) της γραμμικότητας και β) της σταθερότητας στο χρόνο.

Το τι θα θεωρηθεί σαν μοναδιαία διάρκεια και ένταση της βροχής το καθορίζουμε ανάλογα με τα δεδομένα του συγκεκριμένου προβλήματος, γενικά όμως προτιμούμε να ορίσουμε σαν διάρκεια την 1 ώρα και σαν ένταση το 10 mm/ώρα (Σχήμα 2.5.). Αξιοσημείωτο είναι ότι η διάρκεια και το ύψος του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος δεν είναι αντιστοίχως 1 ώρα και 1 m³/sec, δηλαδή τις μονάδες του χρόνου και της παροχής, αλλά πολλαπλάσια τους, αφού εξαρτώνται από την έκταση και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής.



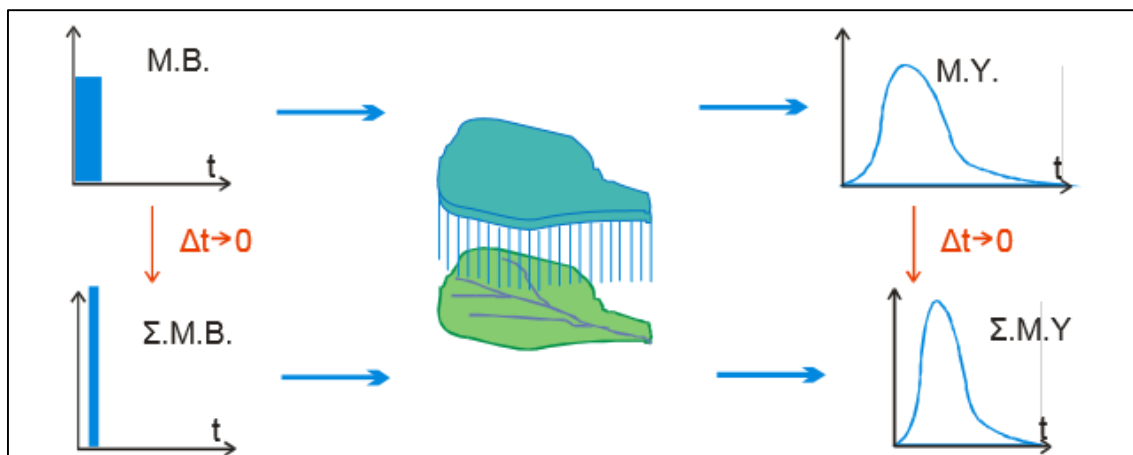
Σχήμα 2.5. Απεικόνιση Μοναδιαίου Υδρογραφήματος για μοναδιαία βροχή μια λεκάνης απορροής [Πηγή: www.auth.gr]

Η θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος είναι εφαρμογή της θεωρίας συστημάτων στην Υδρολογία. Το σύστημα είναι η λεκάνη απορροής που μετατρέπει την βροχή που δέχεται σε απορροή. Οι δύο βασικές αρχές του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος είναι η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας.

2.4.3. Το Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Ένα βήμα πιο πέρα από την έννοια του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος είναι η έννοια του Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος που προκύπτει εάν η διάρκεια της μοναδιαίας βροχής που παράγει το Υδρογράφημα τείνει προς το μηδέν.

Μία από τις δυσκολίες που αποκτούνται από την συσχέτιση μεταξύ του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος και των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής είναι η δυσκολία να εκφραστεί το Μοναδιαίο Υδρογράφημα σε τιμές μιας ή δύο παραμέτρων. Μία συχνή λύση είναι η τιμή αιχμής του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος μιας καθορισμένης διάρκειας, όπου συνήθως είναι το Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα (Σχήμα 2.6.). Ένα ολοφάνερο αρνητικό αυτής της παραμέτρου είναι ότι θα προμηθεύσει μόνο την αιχμή του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος της ίδιας περιόδου όταν εφαρμόζεται σε μια λεκάνη της οποίας τα χαρακτηριστικά της είναι γνωστά. Μια άλλη δυσκολία είναι ότι η σχέση Μοναδιαίου Υδρογραφήματος πρέπει να αποκτάται από επιλεγμένη περίοδο, εκτός και αν η περίοδος αυτή από μόνη της έχει παρθεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Θεωρητικά τα Μοναδιαία Υδρογραφήματα οποιασδήποτε περιόδου μπορούν να προέρχονται από οποιοδήποτε Μοναδιαίο Υδρογράφημα, αλλά η πρακτική δυσκολία απόκτησης Μοναδιαίου Υδρογραφήματος μικρής περιόδου από μακράς περιόδου είναι ευρέως γνωστή. Αυτή η δυσκολία δημιουργείται λόγω ότι μικρά σφάλματα σε δοσμένο Μοναδιαίο Υδρογράφημα μπορούν να προκαλέσουν “hunting”, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε πολύ διαστρεβλωμένη μορφή στο εξαγώμενο μικρής περιόδου Μοναδιαίο Υδρογράφημα.

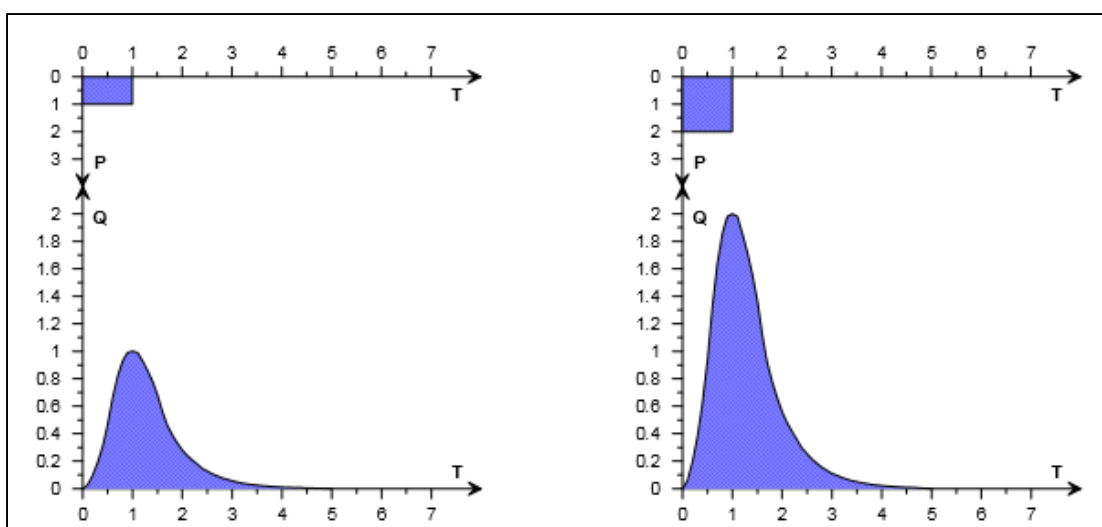


Σχήμα 2.6. Θεωρία του Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος και του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος [Πηγή: www.auth.gr]

2.4.4. Σύνθετα Υδρογραφήματα

Τα Υδρογραφήματα που προέρχονται από βροχές πολλαπλάσιας έντασης ή/και διάρκειας, καθώς και αυτά προέρχονται από σύνθετες μορφές βροχής μπορούν να υπολογισθούν από το Μοναδιαίο Υδρογράφημα εφαρμόζοντας τις παρακάτω αρχές:

- της γραμμικότητας, δηλαδή διπλάσια ένταση βροχής θα διπλάσια παροχή, τριπλάσια ένταση θα δώσει τριπλάσια παροχή κ.ο.κ. (Σχήμα 2.7.)

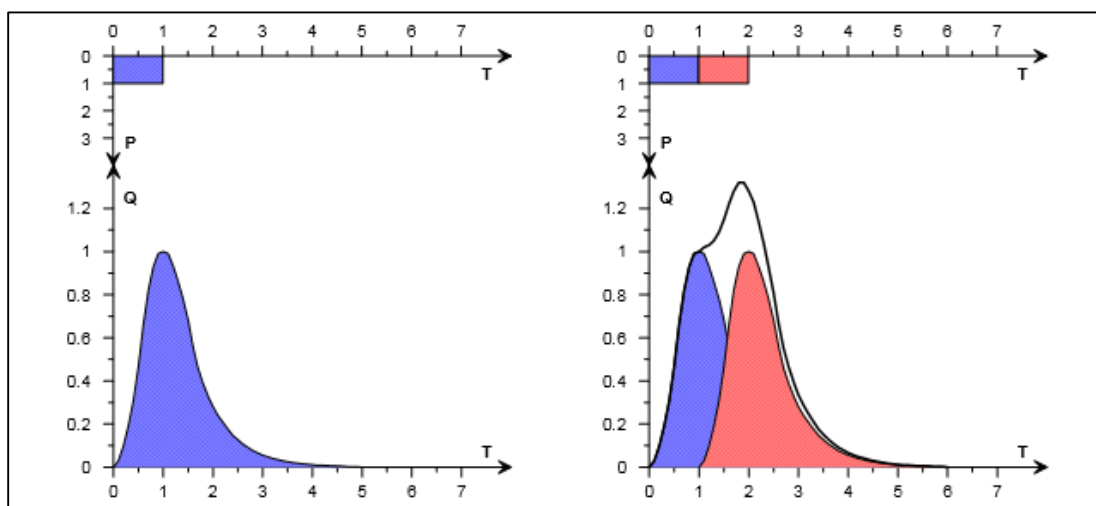


Σχήμα 2.7. Απεικόνιση Υδρογραφήματος διπλάσιας έντασης [Πηγή: www.auth.gr]

Κεφάλαιο 2. Υδρολογική Ανάλυση σε Σ.Γ.Π. (GIS)

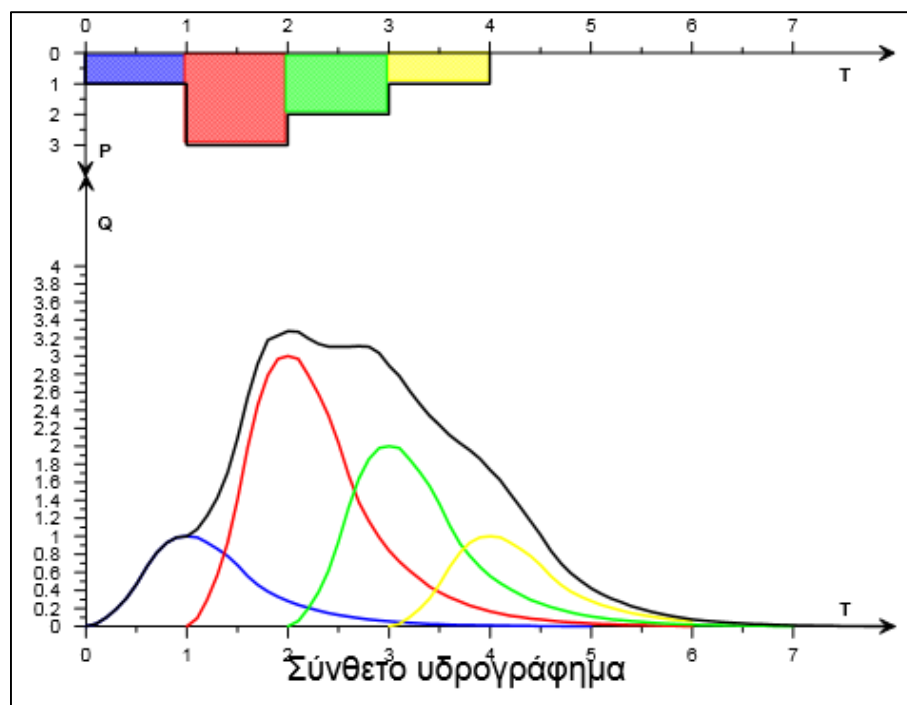
- της σταθερότητας στον χρόνο, δηλαδή κάθε παράταση της διάρκειας της βροχής θα θεωρηθεί σαν μια νέα βροχή που αρχίζει όταν τελειώνει η προηγούμενη και είναι τελείως ανεξάρτητη από αυτήν, άρα παράγει ένα δικό της Υδρογράφημα, που αρχίζει όμως όταν αρχίζει η νέα αυτή περίοδος της βροχής. Τα Υδρογραφήματα που προκύπτουν με αυτόν τον τρόπο παρουσιάζουν αλληλεπικαλύψεις και το πραγματικό τελικό αποτέλεσμα θα είναι το άθροισμα των τεταγμένων (δηλαδή των παροχών), των Υδρογραφημάτων (Σχήμα 2.8.).

Η συνηθέστερη βέβαια περίπτωση στην πραγματικότητα είναι να έχουμε μια βροχή αρκετά μεγάλης διάρκειας με συνεχώς μεταβαλλόμενη ένταση. Το Υδρογράφημα που θα προκύψει είναι ένα σύνθετο Υδρογράφημα και θα υπολογιστεί χωρίζοντας την συνολική διάρκεια μοναδιαίας βροχής, υπολογίζοντας τα ανεξάρτητα Υδρογραφήματα για κάθε περίοδο και συνθέτοντας το τελικό Υδρογράφημα προσθέτοντας τις τεταγμένες των ανεξάρτητων Υδρογραφημάτων κατά τους ίδιους χρόνους (Σχήμα 2.9.).



Σχήμα 2.8. Απεικόνιση Υδρογραφήματος από βροχή διπλάσιας διάρκειας

[Πηγή: www.auth.gr]



Σχήμα 2.9. Απεικόνιση σύνθετου Υδρογραφήματος [Πηγή: www.auth.gr]

2.4.5. Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα

Στην βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα προσεγγίσεων που επιχειρούν να συσχετίσουν το σχήμα και τα συναφή χαρακτηριστικά μεγέθη του Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, με τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Η χρήση του Στιγμαίου Υδρογραφήματος προτιμάται σε σχέση με το Μοναδιαίο Υδρογράφημα κάποιας τυπικής διάρκειας βροχής.

Η έννοια του Γεωμορφολογικού Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος διατυπώθηκε πρώτη φορά από τους Rodriguez-Iturbe και Valdes (1979) και εξακολουθεί να αποτελεί πρόσφορο πεδίο έρευνας. Η μέθοδος βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις:

- αν δεν υπάρχουν έργα ελεγχου της απορροής, τα φυσικά αποστραγγιστικά μπορούν να θεωρηθούν τυχαία πεδία
- τα μήκη των συνδέσεων και οι αντίστοιχες επιφάνειες είναι τυχαίες μεταβλητές

Το Γεωμορφολογικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα δημιουργήθηκε για να συσχετίσει το Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα μιας λεκάνης απορροής με την γεωμετρία του δικτύου ροής και με

μερικές εκφράσεις της ταχύτητας πλημμύρας ή του μήκους δικτύου. Αποτέλεσμα είναι το Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα να γίνει συνθετικό από τις πληροφορίες που παρέχονται από έναν τοπογραφικό χάρτη της περιοχής. Η ιδέα παρουσιάστηκε ως εναλλακτική από την παραδοσιακή μέθοδο επιδιώκοντας την εμπειρική σχέση ανάμεσα στο υπολογισμένο Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα και στα κατάλληλα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Οι γεωμορφολογικές σχέσεις δεν περιέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για να εξάγουν την κλίμακα του Μοναδιαίου Στιγμιαίου Υδρογραφήματος, η οποία κλίμακα είναι σαφώς πιο σημαντική από την μορφή του. Η κλίμακα δεν μπορεί να υπολογιστεί χωρίς στοιχεία μετρημένης ταχύτητας ή κάποιων παρατηρήσεων του χρόνου υστέρησης της λεκάνης απορροής.

Σε αντίθεση με τις άλλες προσεγγίσεις για την παραγωγή του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος μιας λεκάνης, η μέθοδος του Γεωμορφολογικού Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος χειρίζεται το πρόβλημα πιθανοτικά (Ευστρατιάδης κ.α., 2012).

2.4.6. Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα με την μέθοδο Clark

Ο Clark ανέπτυξε ένα μοντέλο Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος θεωρώντας ότι το υδρογράφημα απορροής οποιασδήποτε καταϊγίδας χαρακτηρίζεται από τη διόδευση και την αποθηκευτική ιδιότητα κάθε επιμέρους υπολεκάνης της λεκάνης απορροής. Οι αρχές του Υδρογραφήματος είναι οι εξής:

$$\triangleright \left[\frac{I_1 + I_2}{2} \right] * \Delta_t - \left[\left(Q_1 + \frac{Q_2}{2} \right) \right] * \Delta_t \quad (2.1)$$

$$\triangleright S_1 = K * Q_1 \quad (2.2)$$

$$\triangleright S_2 = K * Q_2 \quad (2.3)$$

όπου, I: εισροές, Q: εκροές, S: αποθηκευτική ικανότητα, K: συντελεστής αποθήκευσης, Δt: χρονικό βήμα.

Η ιδέα του Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος εισήχθη από τον Clark το 1945. Το Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα εφαρμόζεται ομοιόμορφα σε όλη την λεκάνη απορροής και είναι ανεξάρτητο του χρόνου σύμφωνα με τον Noorbaksh (2005). Για να αντλήσεις το Μοναδιαίο Στιγμιαίο Υδρογράφημα, το μοντέλο Clark's απαιτεί τρεις παραμέτρους τον χρόνο συγκέντρωσης (T_c) και τον συντελεστή αποθηκευτικότητας (R) και το ιστόγραμμα χρόνου

επιφάνειας. Ο προσδιορισμός του χρόνου συγκέντρωσης είναι διαφορετικός από τον υπολογισμό του οπουδήποτε στην Υδρολογία. Ο χρόνος Clark's είναι ο χρόνος του ταξιδιού που απαιτείται από την τελευταία σταγόνα της βροχής μέχρι το πιο απομακρυσμένο υδρολογικό σημείο της λεκάνης απορροής για να φτάσει στο κανάλι δικτύου, σε αντίθεση με την κανονική έξοδο που χρησιμοποιείται συνήθως (Straub 2000). Για γραμμικό σύστημα και για μικρή μεταφορά ροής οι δύο ορισμοί είναι ισοδύναμοι. Το μοντέλο Clark ερμηνεύει την υδρολογικά ανταπόκριση ανάμεσα σε δύο διαφορετικές λειτουργίες, τη μεταφορά και την εξασθένηση. Η μεταφορά ροής λαμβάνεται υπόψη από το διάγραμμα χρόνου-εμβαδού, όπου η εξασθένηση παράγεται εξαιτίας της αποθήκευσης του καναλιού (Schulz, 1976).

2.5. Μοντέλα βροχής-απορροής

Τα εννοιολογικά μοντέλα βροχής-απορροής ή Conceptual Rainfall-Runoff (CRR) σχεδιάστηκαν για να προσεγγίσουν μέσω των διαδικασιών τους, τους γενικούς φυσικούς μηχανισμούς που διέπουν τον υδρολογικό κύκλο. Για αυτό το λόγο, τα CRR μοντέλα έγιναν πολύ ελκυστικά σε υδρολόγους και σε μηχανικούς. Μεταξύ των πιο διαδεδομένων CRR μοντέλων είναι το Soil Moisture Accounting Portion (SAC-SMA) του Εθνικού Μετεωρολογικού Συστήματος και διάφορες πτυχές του Standford Watershed Model (SWM).

Οι τύποι των συναρτήσεων και το ποσοστό των λεπτομερειών που αντιπροσωπεύει το σύστημα δείχνει την φύση και τον ρεαλισμό του μοντέλου CRR. Σε κάθε τέτοιο μοντέλο είναι σημαντικό να είμαστε ικανοί να βρούμε κατάλληλες τιμές παραμέτρων, τα οποία διέπουν τις συναρτήσεις. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται προσαρμογή (calibration). Η αποτελεσματική εφαρμογή αυτών των μοντέλων εξαρτάται από το πόσο καλά έχει γίνει η προσαρμογή. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αυτόματες προσεγγίσεις για την προσαρμογή και διάφορες δυσκολίες σε εφαρμογές μεθόδων έχουν σημειωθεί παρόλο που έχουν μεγάλη ανάπτυξη τα συγκεκριμένα μοντέλα. Εκτός από την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων για την προσαρμογή του μοντέλου είναι δύσκολο επίσης, το κατά πόσο ευαίσθητες είναι αυτές για τον υπολογισμό τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ένα μοντέλο που αντιπροσωπεύει καλά το πρόβλημα είναι το μοντέλο SIXPAR. Τέλος, μία νέα δυναμική παγκόσμια διαδικασία παρουσιάστηκε με τίτλο Shuffled Complex Evaluation (SCE) method, η οποία είναι ικανή να εδραιώσει σε παγκόσμια κλίμακα το SIXPAR μοντέλο και να λύσει αποτελεσματικά τα προβλήματα CRR μοντέλων (Duan, 1992).

2.6. Παραδείγματα-Υδρολογικές εφαρμογές σε περιβάλλον Σ.Γ.Π.

2.6.1. Υπολογισμός Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με την μέθοδο Clark's χρησιμοποιώντας μεθόδους Σ.Γ.Π.

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα της υδρολογικής ανάλυσης και της κατασκευής Υδρογραφημάτων για ένα δοσμένο σχέδιο είναι η ανάπτυξη του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος. Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα είναι ένα Υδρογράφημα, το οποίο το ύψος της απορροής του είναι ίσο με ένα. Αυτό σημαίνει ότι αν χωρίσουμε τον όγκο της απορροής στην σχετική λεκάνη θα πάρουμε ένα για το ύψος της απορροής.

Το κύριο ζήτημα του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος είναι ότι καθιστά ικανό να παραχθεί το Υδρογράφημα από δοσμένη πλημμύρα, με βάση την οποία σχεδιάζεται η υδραυλική δομή του έργου. Για το Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα η επίδραση του χρόνου απορρίπτεται και κατασκευάζεται ένα μοναδικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα για την δοσμένη λεκάνη απορροής. Το θετικό του Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος αντί του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος είναι ότι το Στιγμαίο σχετίζεται μόνο με την αποτελεσματική βροχόπτωση, επομένως κατά την διάρκεια της ανάλυσης μία παράμετρος παραλείπεται. Το Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα μπορεί παραχθεί από δεδομένα βροχής-απορροής. Εάν αυτά τα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα, παράγεται από το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα. Συμπερασματικά, η χρήση Στιγμαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος για την εύρεση της βροχής-απορροής σε μια λεκάνη είναι πιο κατάλληλη από τα απλά Μοναδιαία Υδρογραφήματα.

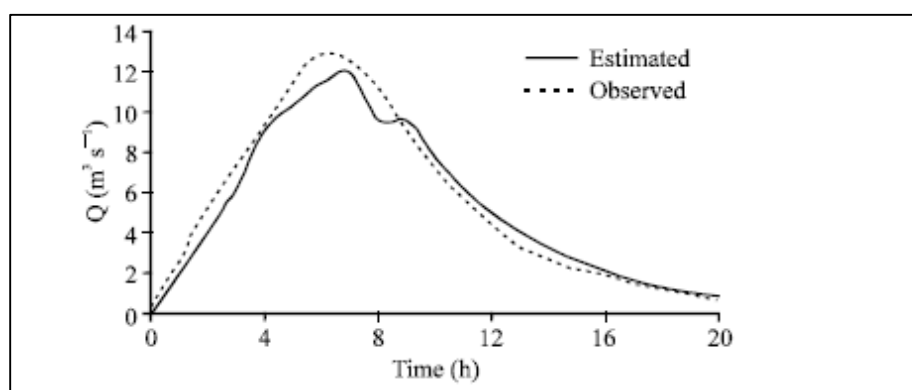
Η ανάπτυξη Σ.Γ.Π. έχει πάρει μεγάλες διαστάσεις στην μηχανική των ποταμών, αφού όλα τα λογισμικά τα οποία χρησιμοποιούνται είναι συμβατά με τα Σ.Γ.Π. Σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους τα Σ.Γ.Π. καταγράφουν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ψηφιακά και χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους για την επιβολή των δεδομένων από διαφορετικές πηγές. Η πιο σημαντική δυνατότητα των Σ.Γ.Π. είναι η ικανότητα να αναλύει σύγχρονα αρχεία δεδομένων τοποθεσίας. Στις μέρες μας η έννοια του Σ.Γ.Π. έχει αλλάξει και δεν είναι απλά μία απλή τράπεζα δεδομένων σώζοντας διαφορετικά αρχεία αλλά να λογισμικό που βοηθάει να ληφθούν και αποφάσεις κάνοντας συγκεκριμένες διεργασίες. Πολλοί πιστεύουν ότι αντί του ονόματος των Σ.Γ.Π (Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών) πρέπει να ονομάζεται Σ.Γ.Δ. (Σύστημα Γεωγραφικής Διαχείρισης). Λαμβάνοντας υπόψη την σημαντικότητα του Σ.Γ.Π. και του

Κεφάλαιο 2. Υδρολογική Ανάλυση σε Σ.Γ.Π. (GIS)

στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος είναι αναγκαίο να δημιουργηθεί ένα εργαλείο που να συνδυάζει τα δύο παραπάνω και να τα ενοποιεί σαν ένα μοναδικό σύστημα. Αυτό μπορεί να σημειωθεί ως ένα σημαντικό βήμα για την ανάπτυξη διαχειριστικών συστημάτων, τα οποία μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα των πληροφοριών που δίνονται στους πελάτες.

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι να βρεθεί με την μέθοδο του Clark's το Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα στην Kardeh λεκάνη απορροής στην περιοχή Khoresan στο βόρειο τμήμα του Ιράν χρησιμοποιώντας το λογισμικό Arcview του GIS. Η μέθοδος του Clark's απαιτεί υπολογισμό τριών βασικών παραμέτρων για την παραγωγή του Στιγμιαίου Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, του χρόνου συγκέντρωσης, του συντελεστή αποθήκευσης-εξασθένησης και το ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας της λεκάνης.

Η περιοχή Khoresan έχει ελάχιστο υψόμετρο 1300 m πάνω από την θάλασσα και μέγιστο 2960m. Το μέσο υψόμετρο υπολογίστηκε και είναι 2021 m και το εμβαδόν της λεκάνης είναι 542 km². Χρησιμοποιώντας το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος GIS το flow direction, το flow length, και ο Curve Number (CN). Στην συνέχεια οι τρεις βασικοί παράμετροι της μεθόδου Clark's που αναφέρθηκαν προηγουμένως και κατασκευάστηκε το Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα (Σχήμα 2.10.). Από το Σχήμα παρατηρείται ότι η σύγκριση του παρατηρημένου Υδρογραφήματος με το παραγόμενο Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα είναι εφικτή, αφού τα δύο Υδρογραφήματα έχουν πολύ κοντινές τιμές (Noorbakhsk et al., 2005).



Σχήμα 2.10. Σύγκριση των δύο Υδρογραφημάτων [Πηγή: Noorbakhsk et al., 2005]

2.6.2. Αξιολόγηση χρόνου υστέρησης και χρόνου συγκέντρωσης σε μικρές λεκάνες ποταμών χρησιμοποιώντας τεχνικές Σ.Γ.Π.

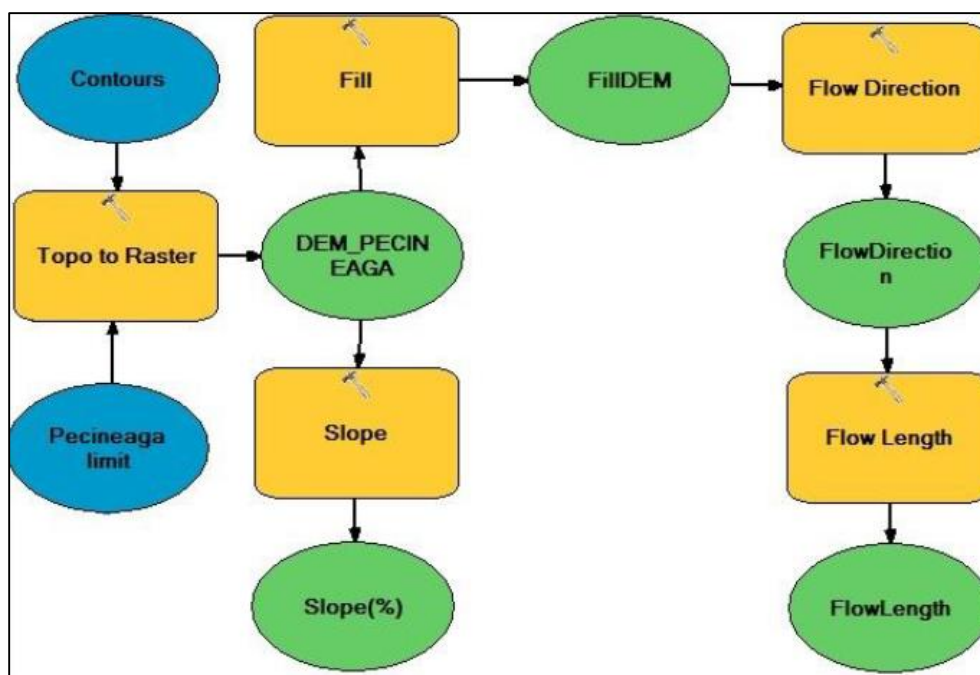
Η χρησιμοποίηση των τελευταίων τεχνικών μοντελοποίησης υδρολογικών διαδικασιών είναι απαραίτητη σήμερα, εξαιτίας της ανάγκης εύρεσης των αποτελεσματικότερων μεθόδων πρόγνωσης υδρολογικών φαινομένων. Διαβάζοντας ακραία υδρολογικά φαινόμενα αποκτά η έρευνα μεγαλύτερη σημασία δίνοντας μία νέα γενιά στην αντιμετώπιση ακραίων φυσικών καταστροφών (Hudson, Colditz, 2003).

Εξαιτίας της γεωγραφικής της θέσης η Ρουμανία είναι μία από τις χώρες με την πιο μεγάλη συχνότητα υδρολογικών φαινομένων κινδύνου όπως στιγμιαίες πλημμύρες και πλημμύρες ποταμών σε αντίθεση με άλλες χώρες της νοτιο-ανατολικής Ευρώπης. Ως αποτέλεσμα του τελευταίου πολλές θεωρίες αναφερόμενες στην διαδικασία βροχής-ροής μπορεί κάποιος να βρει στην παγκόσμια και στην Ρουμανική λογοτεχνία. Μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους υπολογισμού της ροής νερού σε κλίσεις εδάφους από μία δεδομένη κατακρήμνιση είναι ο αριθμός του Curve που αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Προστασίας Εδάφους στις Η.Π.Α (Soil Conservation Services from USA).

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι να υπολογίσει τον σταθμισμένο αριθμό Curve στην Pecineaga λεκάνη απορροής με SCN-CN μέθοδο. Έχοντας υπολογίσει τον CN για μια συγκεκριμένη περιοχή είναι εύκολο να υπολογιστούν διάφορες παράμετροι για την βαθμονόμηση άλλων μοντέλων βροχής-απορροής. Σε αυτή τη μελέτη η πρώτη παράμετρος που μπορεί να βρεθεί είναι ο χρόνος υστέρησης από τον οποίο μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ο χρόνος συγκέντρωσης. Αυτός είναι και ο στόχος της μελέτης, ο υπολογισμός δηλαδή αυτών των δύο χρονικών τιμών.

Ο Pecineaga ποταμός βρίσκεται στο κεντρικό νοτιο-ανατολικό τμήμα της Ρουμανίας και συμβάλλει με τον ποταμό Slanic. Η επιφάνεια της λεκάνης είναι 60 km², τιμή η οποία ανήκει στην κατηγορία των μικρών λεκανών απορροής. Η λεκάνη είναι χαμηλής επιφάνειας και έχει κυκλικό σχήμα με μικρές κλίσεις της τάξεως του 20% προκαλώντας μεγάλες πιθανότητες πλημμυρών. Σε αυτή την μελέτη ο χρόνος υστέρησης υπολογίστηκε σύμφωνα με το Soil Conservation Services from USA και χρησιμοποιήθηκαν διάφορες παράμετροι όπως το μήκος ροής της λεκάνης, ο μέσος όρος του αριθμού Curve και η μέση κλίση εδάφους της λεκάνης. Το

μήκος ροής (L) και η μέση κλίση υπολογίστηκαν σε περιβάλλον GIS και η διαδικασία που ακολουθήθηκε φαίνεται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11. Υπολογισμός μήκους ροής και μέσης κλίσης εδάφους σε περιβάλλον GIS

[Πηγή: Costache, Romulus, 2014].

Έχοντας υπολογίσει το μήκος ροής και την κλίση εδάφους μπορεί από τύπους να υπολογιστεί ο χρόνος υστέρησης και στην συνέχεια ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι χαμηλές τιμές αυτών των δύο παραμέτρων εγκυμονούν πιθανότητες μεγάλων πλημμυρών στην λεκάνη απορροής με τον φόβο στις κοντινές κατοικήσιμες περιοχές (Costache, Romulus, 2014).

2.6.3. Γεωμορφολογικά Στιγμαιαία Μοναδιαία Υδρογραφήματα σε περιβάλλον GIS χρησιμοποιώντας Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά.

Το Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα (Γ.Σ.Μ.Υ.) είναι μία λειτουργική προσέγγιση, η οποία εφαρμόζεται απευθείας σε μη μετρήσιμες λεκάνες για τον υπολογισμό της απορροής από μία πιθανή βροχόπτωση. Δεν απαιτεί συμβατικές μεθόδους για τον εντοπισμό του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος, γιατί τα ιστορικά δεδομένα βροχής-απορροής κάποιων μετρήσιμων λεκανών απαιτείται να αναλυθούν. Εξαιτίας αυτών των χαρακτηριστικών το

Κεφάλαιο 2. Υδρολογική Ανάλυση σε Σ.Γ.Π. (GIS)

παραπάνω Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα κερδίζει ολοένα και μεγαλύτερη δημοτικότητα και ευρεία αποδοχή στον επιστημονικό κόσμο.

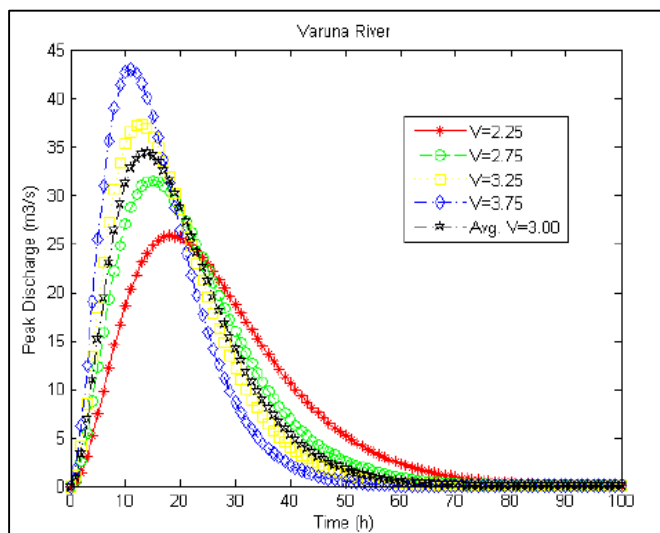
Η διαθεσιμότητα και η ακρίβεια δεδομένων απορροής για τις μικρές και μεσαίες λεκάνες απορροής είναι πάντοτε υπό αμφισβήτηση κυρίως σε μη ανεπτυγμένες χώρες όπως είναι η Ινδία. Οι αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες προκαλούνε αλλαγές στην γεωμορφολογία των λεκανών απορροής και στην περιοχή που λαμβάνουν χώρα οι βροχοπτώσεις. Επίσης, εξαιτίας των διαφορετικών ανθρωπογενών και κλιματικών αλλαγών η χρήση του εδάφους υφίσταται μία σταδιακή μετάβαση και αυτό έχει αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά της βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής. Για αυτό τον λόγο η Υδρολογική συμπεριφορά μη μετρήσιμων λεκανών είναι εμφανής στην σύζευξη των Υδρολογικών χαρακτηριστικών με τις Γεωμορφολογικές παραμέτρους. Εξαιτίας όλων αυτών δημιουργήθηκε το Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα από τον Rodriguez-Iturbe and Valdes (1979) ως πρώτο βήμα για σύζευξη των υδρολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής με τις γεωμορφολογικές παραμέτρους. Το Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα έχει ισχύ σε μη μετρήσιμες λεκάνες όπου η βροχή είναι διαθέσιμη αλλά η απορροή όχι.

Το συγκεκριμένο Υδρογράφημα έχει πολλά πλεονεκτήματα από τις συμβατικές μεθόδους Στιγμαίων Μοναδιαίων Υδρογραφημάτων όπως για παράδειγμα η μέθοδος Clark's (1945) και η μέθοδος του Nash (1957), αφού αποφεύγει την απαίτηση δεδομένων ροής. Επίσης, εξαιτίας της δυναμικότητας που χαρακτηρίζει την φύση τα μοντέλα του Clark's και του Nash απαιτούν τακτική αναθεώρηση των δεδομένων λόγω των αλλαγών στις χρήσεις γης και των κλιματικών συνθηκών. Τέλος, η μέθοδος αυτή είναι καλύτερη από τις άλλες μεθόδους υπολογισμού της απορροής επειδή δεν απαιτεί πληροφορίες σχετικά με τις άλλες λεκάνες απορροής στην εξεταζόμενη περιοχή. Χαρακτηριστικά των καναλιών είναι το μήκος, η τάξη, η κλίση και η πυκνότητά τους. Όλα τα παραπάνω αποτελούν τις Γεωμορφολογικές παραμέτρους.

Τα φυσικά χαρακτηριστικά μια λεκάνης απορροής και ενός δικτύου αποχέτευσης είναι μεγάλης σημασίας επειδή αντανακλούν την υδρολογική συμπεριφορά και συχνά χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης. Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι το εμβαδόν της λεκάνης, η μορφή της λεκάνης, η κλίση εδάφους και το κέντρο βάρους της λεκάνης.

Το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) υποστηρίζει Γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά στον Varuna ποταμό στην περιοχή Varanasi της Uttar Pradesh για να αναπαράγει το Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα. Αυτό χρησιμοποιήθηκε ως μία συνάρτηση μεταφοράς για την μοντελοποίηση της μετατροπής της περίσσειας βροχόπτωσης σε επιφανειακή απορροή. Η εξαγωγή του δικτύου αποστράγγισης της λεκάνης απορροής με χρήση GIS μας δίνει την μορφή της λεκάνης απορροής η οποία είναι πολύ κοντά στα πραγματικά δεδομένα. Ο Varuna ποταμός έχει την τέταρτη μεγαλύτερη λεκάνη με έκταση 3315 km². Το μέγιστο μήκος δικτύου είναι 138 km (Narayan et al., 2012).

Μέσω του GIS υπολογίστηκαν οι απαραίτητες Γεωμορφολογικές παραμέτροι του ποταμού και κατασκευάστηκε το Γεωμορφολογικό Στιγμαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα για διαφορετικές τιμές ταχύτητας (Σχήμα 2.12.)



Σχήμα 2.12. Γ.Σ.Μ.Δ. για διαφορετικές ταχύτητες δικτύου [Πηγή: Narayan et al., 2012]

2.7. Λογισμικό ArcGis

Στο σημείο αυτό είναι αναγκαίο να περιγραφούν οι βασικές εντολές του λογισμικού ArcGis που εκτελέστηκαν κατά την παρούσα εργασία, οι οποίες είναι απαραίτητες για κάθε υδρολογική εφαρμογή.

Basin

Η λεκάνη απορροής δημιουργείται από το εργαλείο basin. Το εργαλείο αυτό δέχεται ως δεδομένο ένα αρχείο raster που αφορά τη διεύθυνση ροής και το αναλύει με τέτοιο τρόπο ώστε να βρει όλα τα σύνολα των συνδεδεμένων μεταξύ τους φατνίων που ανήκουν στην ίδια λεκάνη απορροής. Οι λεκάνες απορροής της περιοχής μελέτης δημιουργούνται από τον εντοπισμό των σημείων συγκέντρωσης των υδάτων και αναγνωρίζοντας την περιοχή που συνεισφέρει για κάθε σημείο ξεχωριστά. Αντίθετα το εργαλείο watershed εκτελεί την ίδια ακριβώς διεργασία αλλά για τα σημεία συγκέντρωσης που επιδεικνύει ο χρήστης.

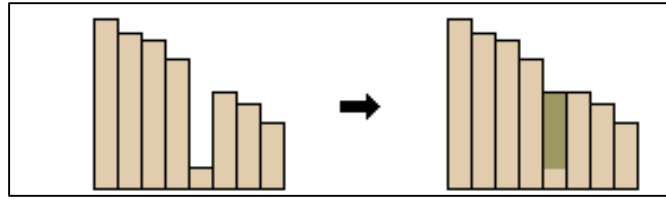
Fill

Πολλές φορές οι ταπεινώσεις (sinks) του υποβάθρου είναι σφάλματα λόγω της ανάλυσης των δεδομένων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM). Για να εξασφαλιστεί η ορθότητα της οριοθέτησης των λεκανών και των υδατικών δικτύων πρέπει να εξαληφθούν αυτές οι ταπεινώσεις. Εάν δεν γίνει αυτό τα παράγωγα υδατικά δίκτυα μπορεί να φαίνονται ασυνεχή. Το εργαλείο αυτό δέχεται ως δεδομένο ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους και δημιουργεί ένα νέο αρχείο στο οποίο έχει εξαλείψει όλες τις ταπεινώσεις μέχρι την καθορισμένη υψομετρική τιμή.

Sink

Με τον όρο βύθισμα (sink) εννοείται κάποιο φατνίο που έχει τιμή υψομέτρου μικρότερη από όλα τα γειτονικά του (8 φατνία που το περιβάλλουν) και έτσι αυτό το φατνίο δεν μπορεί να προσαρμοστεί στην διεύθυνση της ροής. Τα σημεία αυτά έχουν απροσδιόριστη κατεύθυνση ροής και συνήθως τους αποδίδεται μια τιμή που είναι το άθροισμα των πιθανών κατευθύνσεων ροής τους (Σχήμα 2.13.).

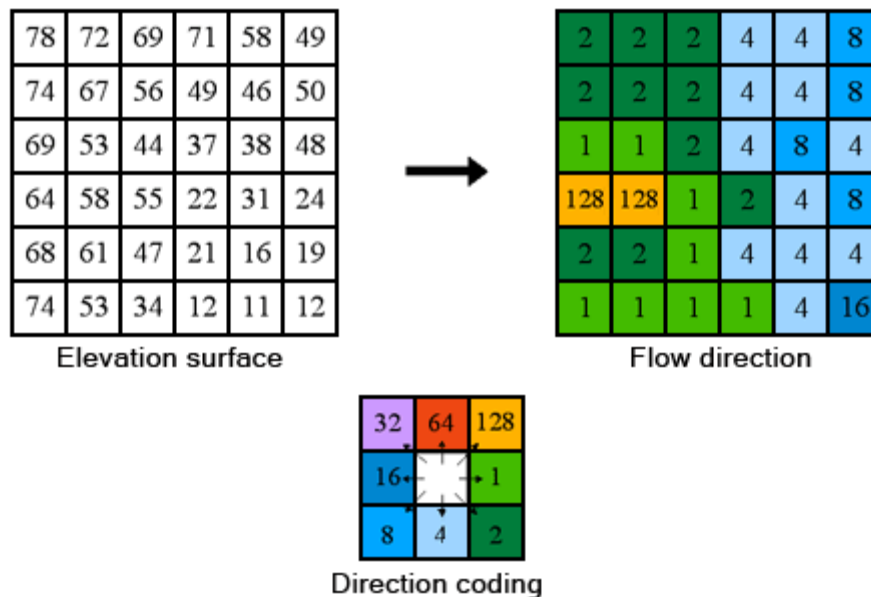
Για την σωστή απόδοση της κατεύθυνσης της ροής το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) πρέπει να είναι απαλλαγμένο από τυχόν βυθίσματα. Τα βυθίσματα αυτά τις περισσότερες φορές προκαλούνται από σφάλματα στα δεδομένα λόγω της μετατροπής των αρχικών τιμών υψομέτρου σε ακέραιες. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του pixel τόσο περισσότερα βυθίσματα εμφανίζονται σε ένα DEM.



Σχήμα 2.13. Απεικόνιση ενός βυθίσματος (sink) [Πηγή: ArcGis 10 Help]

Flow direction

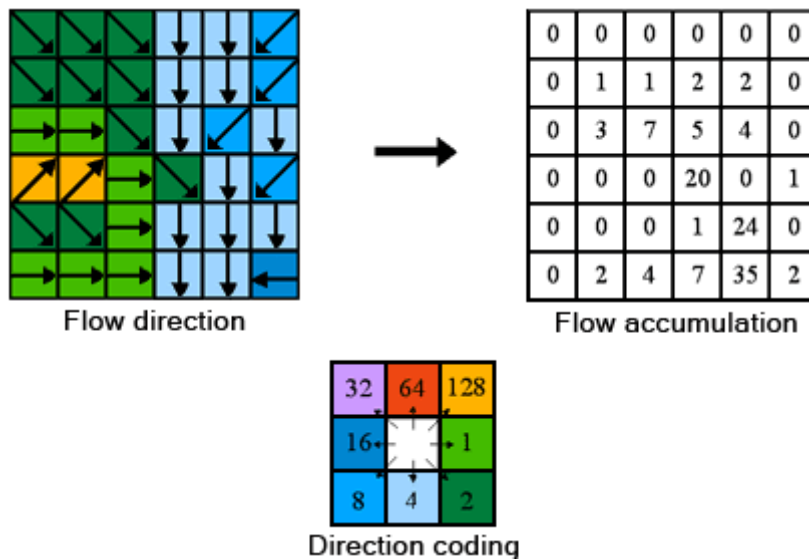
Για να προκύψουν τα υδρολογικά χαρακτηριστικά μιας επιφάνειας πρέπει να καθοριστεί η κατεύθυνση της ροής από κάθε φατνίο της εικόνας raster. Το εργαλείο flow direction δέχεται ως δεδομένο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ενώ έχει υποστεί «γέμισμα» δίνοντας ως αποτέλεσμα ένα αρχείο raster που δείχνει την κατεύθυνση της ροής κάθε φατνίου. Για κάθε φατνίο υπάρχουν 8 διαφορετικές πιθανές κατευθύνσεις ροής που συνδέονται με τα 8 γειτονικά φατνία που ουσιαστικά το περιβάλλουν. Στην συνέχεια ελέγχονται οι τιμές του υψομέτρου στα φατνία αυτά και ορίζεται η κατεύθυνση ροής από τα φατνία με τις μεγαλύτερης τιμές υψομέτρου προς αυτά με τις μικρότερες (Σχήμα 2.14.).



Σχήμα 2.14. Κωδικοποίηση της εντολής flow direction [Πηγή: ArcGis 10 Help]

Flow Accumulation

Το εργαλείο αυτό καθορίζει τη συσσώρευση της ροής με την εξαγωγή ενός raster αρχείου σε κάθε φατνίο του οποίου καταχωρείται μία τιμή που υποδηλώνει τον αριθμό των φατνίων δια μέσου των οποίων διέρχεται το νερό. Το εργαλείο αυτό δέχεται ως δεδομένο το αρχείο που έχει προκύψει από τις κατευθύνσεις ροής (flow direction) και υπολογίζει τον αριθμό των φατνίων που απορρέουν δια μέσου του συγκεκριμένου φατνίου (Σχήμα 2.15.). Τα φατνία τα οποία έχουν υψηλές τιμές συσσώρευσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση ποταμών.



Σχήμα 2.15. Κωδικοποίηση της εντολής Flow Accumulation [Πηγή: ArcGis 10 Help]

Συμπερασματικά, οι τιμές κοντά στην κορυφογραμμή θα είναι μηδενικές ενώ ιδιαίτερα υψηλές θα είναι για περιοχές σε κεντρικές κοίτες ποταμών.

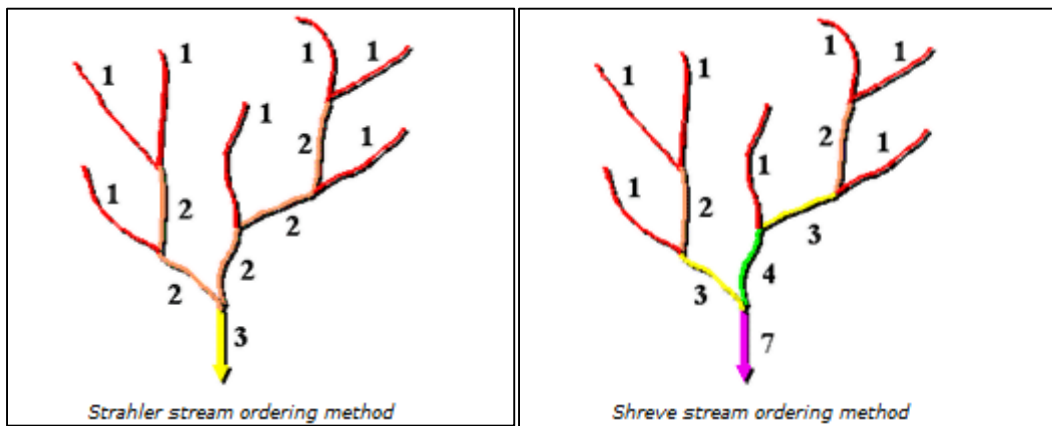
Flow Length

Στην Υδρολογία το μήκος ροής ενός ποταμού ορίζεται ως η απόσταση από οποιοδήποτε σημείο εντός της υδρολογικής λεκάνης ως το σημείο εξόδου της λεκάνης αυτής. Η απόσταση αυτή μετριέται κατά μήκος διεύθυνσης ροής και όχι σε ευθεία γραμμή. Στο λογισμικό GIS ο ορισμός του μήκους ροής σε ένα αυθαίρετο φατνίο αλλάζει και υπολογίζεται ως άθροισμα των στοιχειωδών αποστάσεων από το κέντρο στο κέντρο του κάθε φατνίου κατά μήκος της διεύθυνσης ροής από το επιλεγμένο φατνίο ως το φατνίο εξόδου της λεκάνης.

Όταν βρέχει μια σταγόνα βροχής σε μια περιοχή της λεκάνης απορροής ταξιδεύει μια απόσταση προτού φτάσει στην έξοδο της λεκάνης, συνεπώς το φατνίο με τη μεγαλύτερη απόσταση ροής είναι και το πιο υδρολογικά απομακρυσμένο φατνίο. Από την θεωρία αν διαιρεθεί το μήκος ροής με την ταχύτητα ροής προκύπτει ο χρόνος απορροής της λεκάνης. Ο χρόνος απορροής είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επιφανειακή ροή μέσω των υδατορευμάτων από το πιο μακρινό υδρολογικό σημείο μέχρι την έξοδό της και είναι μια αντιπροσωπευτική κλίμακα του μεγέθους της λεκάνης.

Stream order

Η εντολή αυτή αποτελεί μία μέθοδο απόδοσης αριθμητικής σειράς στους κλάδους ενός υδρολογικού δικτύου. Ταξινομεί και εντοπίζει όλους τους τύπους ροής με βάση τον αριθμό των παραποτάμων του κάθε υδατορεύματος. Εάν είναι γνωστή η ταξινόμηση των ρευμάτων μπορούν να εξαχθούν πολλά χαρακτηριστικά των ρευμάτων. Το εργαλείο έχει δύο τρόπους ταξινόμησης των δικτύων ροής, αυτόν του Strahler (1957) και αυτή του Shreve (1966) (Σχήμα 2.16.). Και στις δύο μεθόδους τα ανάντη τμήματα του ρεύματος είναι τάξης 1.



Σχήμα 2.16. Ταξινόμηση κλάδων υδρογραφικού δικτύου [Πηγή: ArcGis 10 Help]

Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης

3.1. Γεωγραφική θέση Αλφειού ποταμού και περιοχής μελέτης

Ο Αλφειός είναι ο μεγαλύτερος ποταμός της Πελοποννήσου τόσο από πλευράς μήκους, όσο και υδάτινου όγκου. Το ολικό μήκος του είναι 116 χιλιόμετρα. Οι πρώτες πηγές του βρίσκονται στην περιοχή του Ασεατικού πεδίου και κοντά στο Λεοντάρι της Μεγαλόπολης, στους πρόποδες του Ταυγέτου. Ένα σημείο της διαδρομής του είναι υπόγειο, όπου δέχεται νερά από καταβόθρες καθώς και από την λίμνη Τάκα. Ο ποταμός στη διαδρομή του δέχεται τα νερά του Ελισσώνα, του Λούσιου, του Λάδωνα, του Ερύμανθου, του Κλαδέου και άλλων δευτερευόντων παραποτάμων και χειμάρρων.

Ο ποταμός διασχίζει ένα μεγάλο μέρος της Αρκαδίας. Διατρέχει αρχικά το λεκανοπέδιο της Μεγαλόπολης, όπου στην περιοχή εξόρυξης λιγνίτη εκτρέπεται τεχνητά. Στη συνέχεια της πορείας του κατευθύνεται ΒΔ, περνά δίπλα από την Καρύταινα και συμβάλλει με τον ποταμό Λούσιο. Από την περιοχή αυτή δημιουργεί μια βαθιά κοιλάδα ανάμεσα σε επιβλητικούς ορεινούς όγκους (Μαίναλο, Λύκαιο κλπ.) σχηματίζοντας ένα ενδιαφέρον φυσικό ανάγλυφο. Στη συνέχεια και σε ένα μεγάλο μέρος της διαδρομής του αποτελεί το φυσικό όριο μεταξύ Αρκαδίας και Ηλείας.

Ο Αλφειός έχει συμβάλλει στη δημιουργία λιμνοθαλασσών Καϊάφα, Αγουλινίτσας και Μουριάς. Έχει υποστεί αλλοιώσεις από την κατασκευή φραγμάτων και τις αμμοληψίες καθώς επίσης επειδή δέχεται στερεά απόβλητα οικισμών, βιοτεχνιών, βιομηχανιών καθώς και γεωργικά και κτηνοτροφικά απόβλητα. Το δέλτα του αποτελεί κρίκο στην αλυσίδα των υδροτόπων της δυτικής Ελλάδας και έχει υποστεί έντονη υποβάθμιση από τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

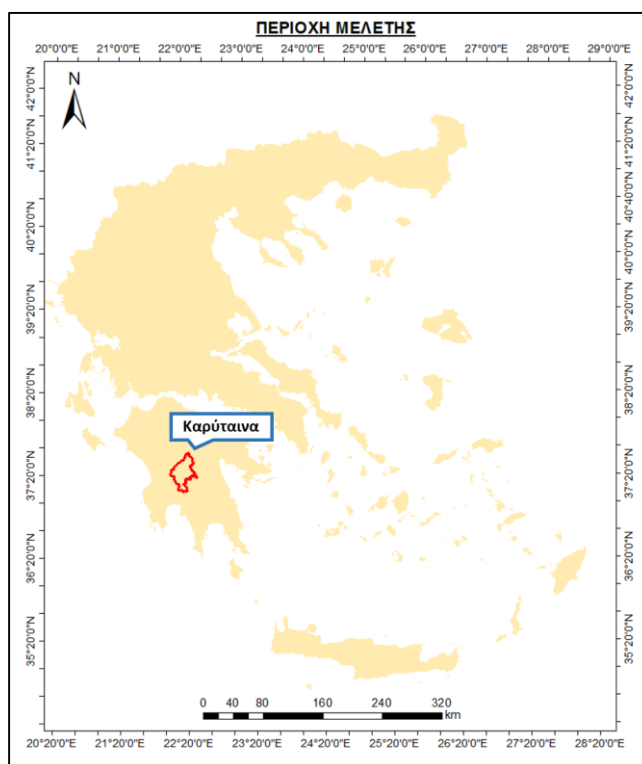
Στο σημείο που συναντώνται ο Λάδωνας και ο Ερύμανθος με τον Αλφειό (Τριποταμιά) δημιουργείται ένα σπουδαίο οικοσύστημα. Στην Αρχαία Ολυμπία υπάρχει φράγμα εκτροπής (φράγμα του Φλόκα) απ' όπου αρδεύονται μεγάλες εκτάσεις των πεδιάδων της Ηλείας.(περί τα 135.000 στρέμματα) (www.arcadia.ceid.upatras.gr). Στο Σχήμα 3.1. που ακολουθεί φαίνεται ένα τμήμα του Αλφειού ποταμού πλούσιο σε νερό και βλάστηση.

Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης



Σχήμα 3.1. Αλφειός ποταμός [Πηγή: www.topodigos.gr]

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην δυτική Πελοπόννησο στην οποία επικρατούν έντονες βροχοπτώσεις κυρίως τους χειμερινούς μήνες. Στην περιοχή δημιουργούνται μεγάλες λεκάνες απορροής και πολλοί παραπόταμοι λόγω των καιρικών συνθηκών. Η εξεταζόμενη λεκάνη απορροής είναι αυτή του άνω ρου του Αλφειού ποταμού. Στο Σχήμα 3.2. φαίνεται η γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης στον Ελλαδικό χάρτη.



Σχήμα 3.2. Γεωγραφική θέση περιοχής μελέτης [Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

3.2. Λεκάνη απορροής άνω ρου του Αλφειού ποταμού

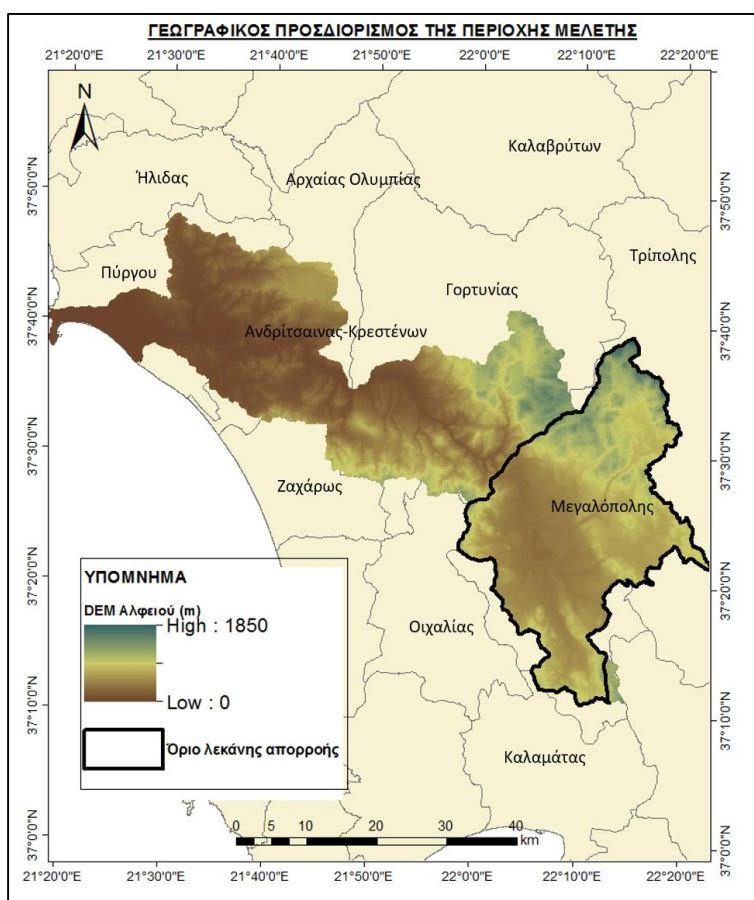
3.2.1. Γεωμετρία-Ανάγλυφο

Το σχήμα της υπό μελέτη λεκάνης απορροής του Αλφειού ποταμού είναι πολύπλοκο και δεν μπορεί να περιγραφεί εύκολα από κάποιο γεωμετρικό σχήμα. Το σχήμα της λεκάνης έχει κατεύθυνση Βορρά-Νότου. Η γεωμετρία της λεκάνης περιγράφεται από κάποια βασικά χαρακτηριστικά της, οι τιμές των οποίων έχουν γίνει απευθείας από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους που χρησιμοποιήθηκε για το τμήμα της λεκάνης απορροής του Αλφειού Ποταμού ήταν 30,55×30,55 m (πηγή: Τομέας Υδατικών Πόρων ΕΜΠ).

Εμβαδόν: 871 km²

Περίμετρος: 192974 m

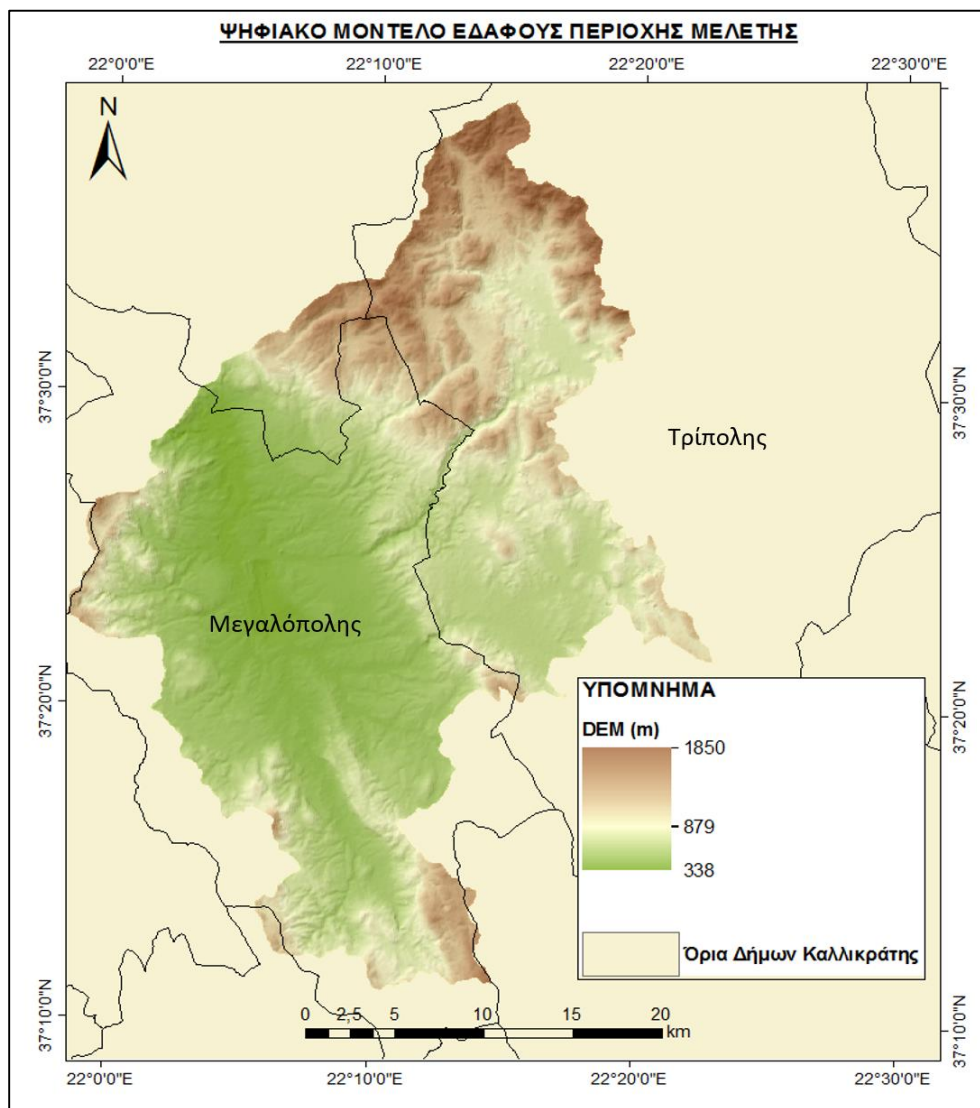
Μήκος κύριου Υδατορεύματος: 60 km



Σχήμα 3.3. Γεωγραφικός προσδιορισμός της περιοχής μελέτης [Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης

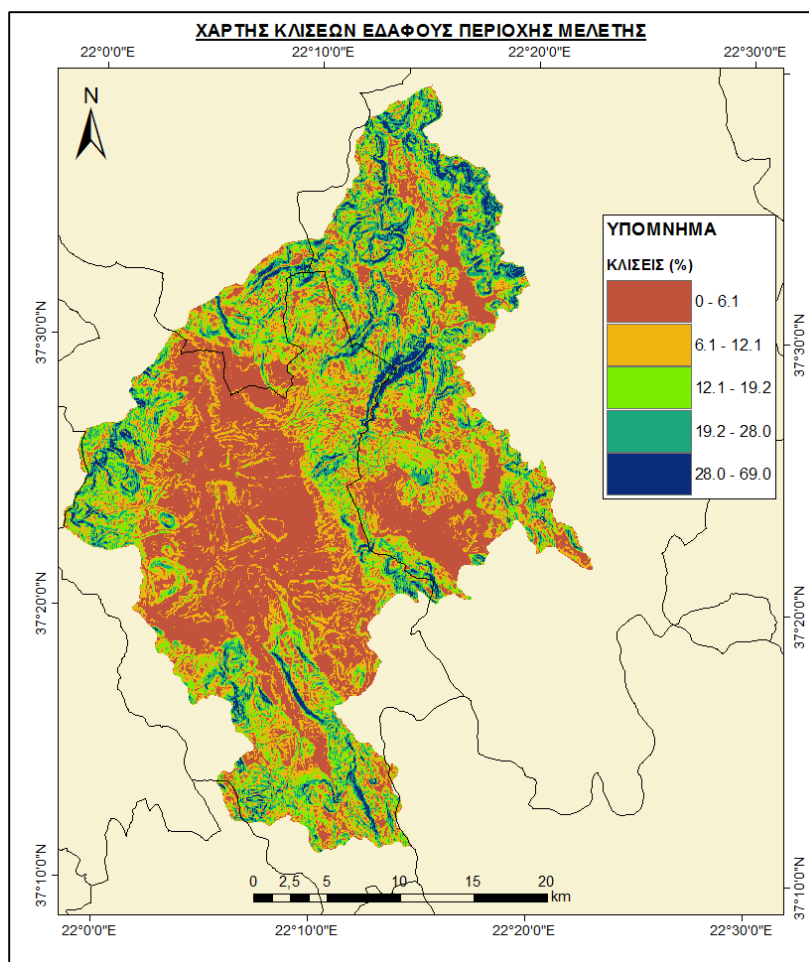
Στο παρακάτω Σχήμα 3.4. έχει αποκοπεί όλη η λεκάνη απορροής του Αλφειού και έχει απομείνει η υπό εξέταση λεκάνη άνω ρου του Αλφειού ποταμού.



Σχήμα 3.4. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους περιοχής μελέτης και όρια Δήμων Καλλικράτης

[Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

Οι κλίσεις εδάφους της εξεταζόμενης περιοχής είναι απαραίτητες για την παρούσα μελέτη καθώς χρειάζονται στην μέθοδο επίλυσης του μοντέλου του Clark και παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5. Κλίσεις εδάφους περιοχής μελέτης [Πηγή: Ίδια επεξεργασία]

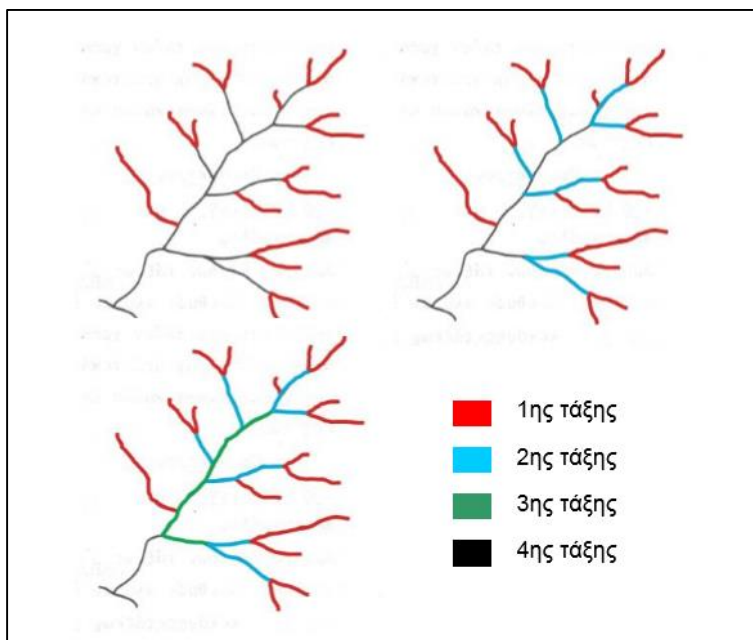
3.2.2. Υδρογραφικό δίκτυο

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής είναι πλούσιο, γεγονός που οφείλεται στην μορφολογία της περιοχής και τις άφθονες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις. Η λεκάνη απορροής πηγάζει κυρίως από τον Ταΰγετο, την υψηλότερη οροσειρά της Πελοποννήσου. Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής είναι 870 km². Για τη δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε κατώφλι 1200 φατινίων στον κάναβο συγκέντρωσης ροής (flow accumulation), το οποίο προέκυψε από την ανάλυση του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους. Η τιμή αυτή του κατωφλίου προέκυψε και με σύγκριση με την πραγματική κατάσταση του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής έτσι ώστε να υπάρχει βελτιστοποίηση και ομοιογένεια με την πραγματικότητα. Τα φατνία με τιμή μικρότερη από αυτή διαγράφονται και έτσι τα φατνία που

Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης

μένουν αποτελούν το υδρογραφικό δίκτυο. Στην ουσία διαχωρίζονται τα φατνία όπου σχηματίζεται η ροή του υδρογραφικού δικτύου από αυτά που περιέχουν τη χερσαία ροή.

Σύμφωνα με τον Strahler (1957) τα ρεύματα τα οποία δεν δέχονται τα νερά μικρότερων κλάδων ρευμάτων ονομάζονται 1^{ης} τάξεως. Σύνδεση δύο κλάδων ίσης τάξης δημιουργεί ένα νέο κλάδο της αμέσου επόμενης τάξης δηλαδή σύνδεση δύο κλάδων 1^{ης} τάξεως δημιουργεί ένα ρεύμα 2^{ης} τάξεως κ.ο.κ. (Σχήμα 3.6.). Στην λεκάνης απορροής της μελέτης οι τάξεις είναι στον Πίνακα 3.1.

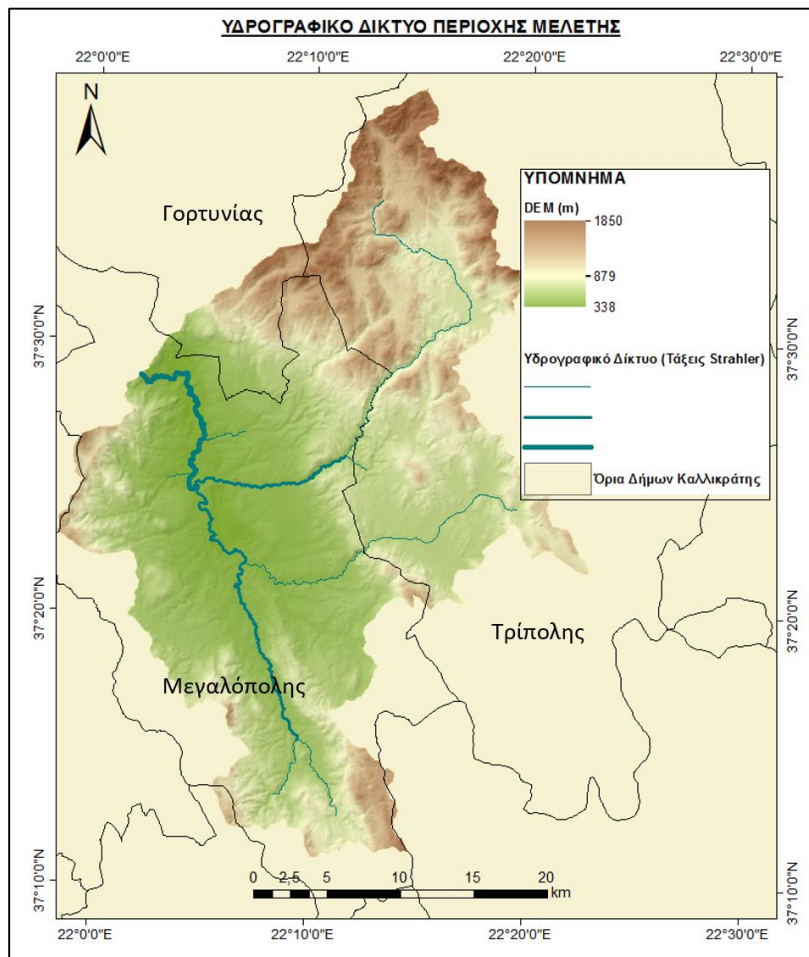


Σχήμα 3.6. Αρίθμηση υδρογραφικού δικτύου κατά Strahler (1952) [Πηγή: www.geo.auth.gr]

Πίνακας 3.1. Ταξινόμηση τάξεων Strahler και μήκος κάθε τάξης στην λεκάνη απορροής

Τάξεις κατά Strahler	Μήκος (km)
1 ^{ης}	73,78
2 ^{ης}	37,60
3 ^{ης}	14,25

Στο παρακάτω Σχήμα 3.7. παρουσιάζεται το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής σύμφωνα με τις τάξεις του Strahler. Το υδρογραφικό δίκτυο φτάνει έως κλάδους 3^{ης} τάξης.



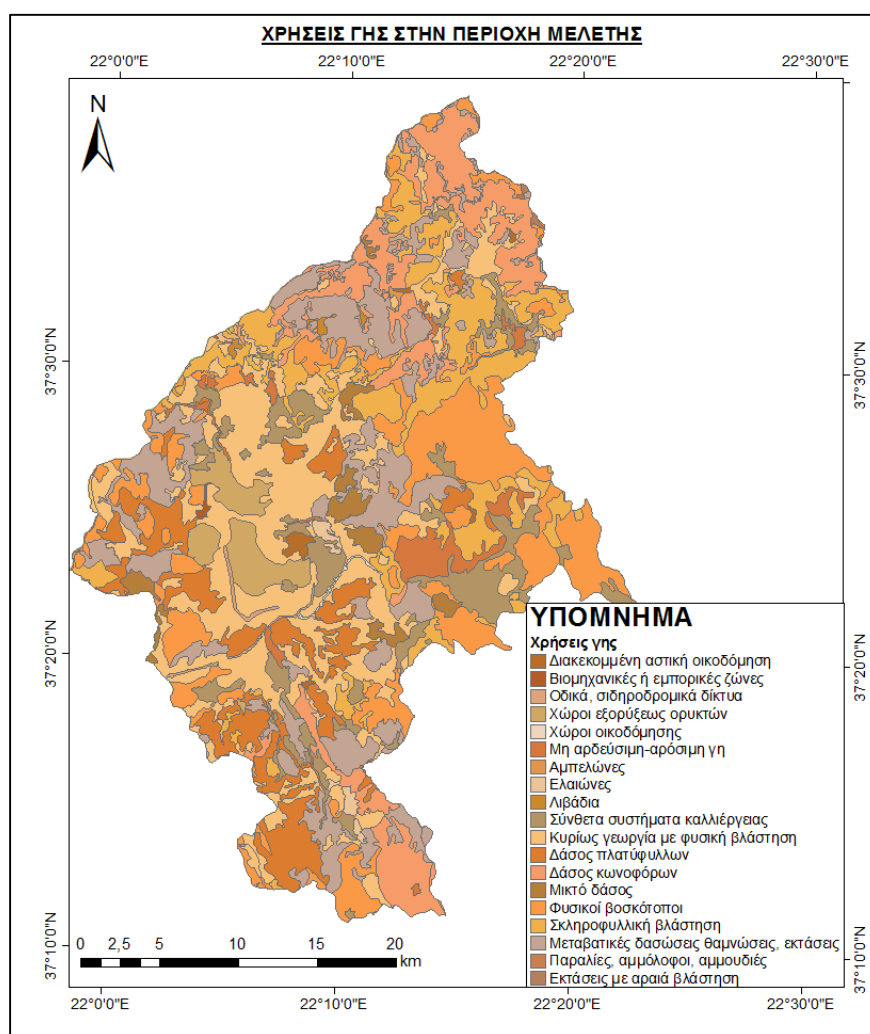
Σχήμα 3.7. Χάρτης υδρογραφικού δικτύου περιοχής μελέτης [Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

3.2.3. Χρήσεις γης

Ο χάρτης χρήσεων γης προέρχεται από το Corine Land Cover 2000 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή κωδικοποίηση Corine, η εδαφική κάλυψη στην Ευρώπη κατηγοριοποιείται σε 44 κατηγορίες, χρησιμοποιώντας χάρτες με κλίμακα 1:100.000. Οι κατηγορίες που προσδιορίστηκαν στην υπό μελέτη λεκάνη του Αλφειού είναι 19. Παρατηρείται ότι στην εξεταζόμενη περιοχή η κύρια χρήση γης είναι η γεωργία με φυσική βλάστηση με ποσοστό περίπου 20%, ενώ σημαντικό ποσοστό επιφάνειας καλύπτουν και οι φυσικοί βοσκότοποι με ποσοστό 16% όπως επίσης και οι δασικές περιοχές (μεταβατικές δασώσεις εκτάσεις, δάσος πλατύφυλλων, δάσος κωνοφόρων) (Σχήμα 3.8.).

Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης

Κάθε χρήση γης αντιστοιχίζεται με έναν συντελεστή τραχύτητας έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί στη συνέχεια η ταχύτητα ροής των υδάτων. Στην εργασία ορίστηκαν 6 τιμές του συντελεστή τραχύτητας και κατανεμήθηκαν ανάλογα με τις διάφορες κατηγορίες χρήσεων γης. Όπως φαίνεται και στον πίνακα η αστική δόμηση και οι βιομηχανικές περιοχές αντιστοιχίστηκαν με υψηλή τιμή συντελεστή τραχύτητας, 200, οι χώροι εξόρυξης ορυκτών και οι φυσικοί βοσκότοποι με συντελεστή τραχύτητας 100 και με 90 η μη αρδεύσιμη γη, οι αμπελώνες, οι ελαιώνες, οι καλλιέργειες και η γεωργία. Μικρότερες τιμές συντελεστή τραχύτητας πήραν τα λιβάδια, η βλάστηση καθώς και οι μεταβατικές δασώσεις εκτάσεις. Τέλος, με μικρό συντελεστή τραχύτητας βαθμολογήθηκαν οι δασικές περιοχές.

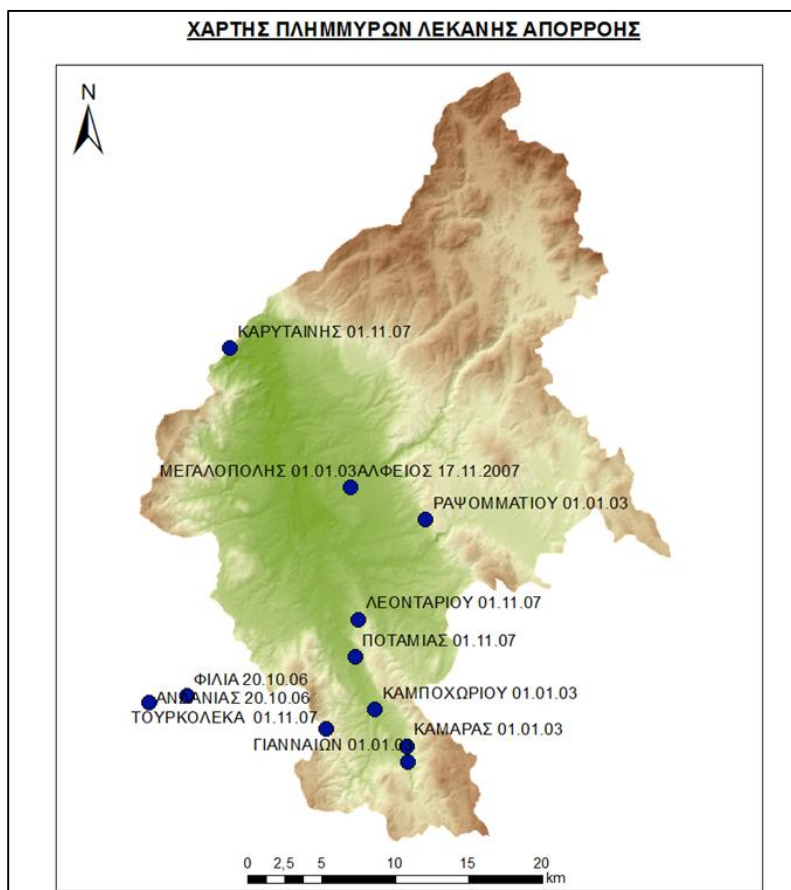


Σχήμα 3.8. Χρήσεις γης στην εξεταζόμενη λεκάνη απορροής του Αλφειού ποταμού

(πηγή: Ίδια επεξεργασία)

3.3. Πλημμύρες στην περιοχή μελέτης

Η δυτική Ελλάδα πλήττεται κάθε χρόνο από φαινόμενα κακοκαιρίας και κυρίως πλημμυρών εξαιτίας των έντονων βροχοπτώσεων. Η λεκάνη απορροής άνω ρου του Αλφειού ποταμού έχει υποστεί σοβαρές πλημμύρες τις ημερομηνίες 1/1/2003 και 17/11/2007. Η πρώτη πλημμύρα έκανε αισθητή την παρουσία της στις περιοχές της Μεγαλόπολης, του Ραψομματίου, του Καμποχωρίου, της Καμάρας και των Πανναιών. Η δεύτερη, η οποία ήταν πιο πρόσφατη προκάλεσε ζημιές στις περιοχές της Καρύταινας, του Αλφειού, του Λεονταρίου, της Ποταμιάς και της Τουρκολέκας. Οι πλημμύρες αυτές δεν ήταν υψηλού κινδύνου καθώς προκάλεσαν μόνο υλικές καταστροφές στις ανθρώπινες ιδιοκτησίες και δεν χάθηκαν ανθρώπινες ζωές. Στο παρακάτω Σχήμα 3.9. φαίνεται η τοποθεσία της κάθε πλημμύρας και η ημερομηνία εκδήλωσής της (www.ypeka.gr).



Σχήμα 3.9. Χάρτης πλημμυρών εξεταζόμενης λεκάνης Αλφειού

[Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

3.4. Βροχογράφοι

Οι βροχογράφοι είναι όργανα σημειακής μέτρησης της βροχής, εγκατεστημένα σε κατάλληλες θέσεις, που συλλέγουν κυρίως τη βροχόπτωση, και βοηθητικά τη χιονόπτωση, καταγράφοντας με απλό ωρολογιακό μηχανισμό τη μεταβολή του ύψους βροχής στο χρόνο, περιγράφοντας έτσι τη χρονική κατανομή της σημειακής βροχόπτωσης. Ένα παράδειγμα βροχογράφου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10. Τυπικός βροχογράφος [Πηγή: www.northmeteo.gr]

Τρεις κυρίως τύποι βροχογράφων είναι σήμερα σε χρήση, ο βροχογράφος με ανατρεπόμενους κάδους, ο σταθμιστικός βροχογράφος και ο βροχογράφος με πλωτήρα. Οι βροχογράφοι δίνουν παρατηρήσεις για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλοι για τη μελέτη της διακύμανσης της έντασης μιας βροχής. Αν ο αυτογραφικός μηχανισμός τους ρυθμιστεί έτσι ώστε το τύμπανο που φέρει το χαρτί καταγραφής να κάνει μια πλήρη περιστροφή την ημέρα (να χρειάζεται δηλαδή αλλαγή χαρτιού κάθε μέρα), το ύψος της βροχής μπορεί να μετράται κατά 5λεπτα διαστήματα. Αν ο μηχανισμός ρυθμιστεί για αλλαγή χαρτιού μια φορά την εβδομάδα, το ύψος βροχής μπορεί να μετράται ανά 30λεπτα διαστήματα. Για να αποφεύγονται χονδροειδή σφάλματα, πρέπει σε κάθε αλλαγή της ταινίας να μετριέται το

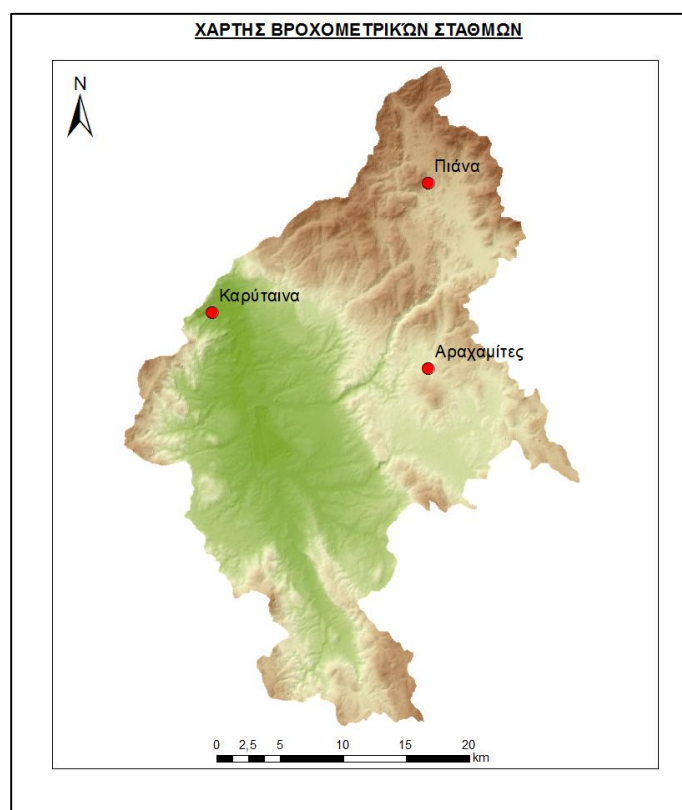
Κεφάλαιο 3. Περιοχή Μελέτης

συνολικό ύψος βροχής στον τελικό κύλινδρο συλλογής της βροχής και να συγκρίνεται με το αντίστοιχο συνολικό ύψος που καταγράφηκε στην ταινία (Μιμίκου, Μπαλάς, 2016).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δύο βροχομετρικούς σταθμούς της Πιάνας και των Αραχαμίτων. Τα δεδομένα των βροχογράφων αυτών καθώς και τα δεδομένα του σταθμού της Καρύταινας φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.2.

Πίνακα 3.2. Δεδομένα βροχομέτρων και σταθμημέτρου στην περιοχή μελέτης

Βροχόμετρα	Συντεταγμένες x	Συντεταγμένες y	Υψόμετρο (m)
Πιάνα (Βρ.)	344624	4159790	997
Αραχαμίτες (Βρ.)	34463	4145113	743
Καρύταινα (Στ.)	327520	4149514	310



Σχήμα 3.11. Γεωγραφικός προσδιορισμός βροχομετρικών σταθμών περιοχής μελέτης

[Πηγή: Ίδια επεξεργασία]

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

4.1. Συλλογή – Ανάλυση – Προεπεξεργασία δεδομένων

4.1.1. Καμπύλη στάθμης - παροχής

Οι καμπύλες στάθμης - παροχής αποτελούν τη σχέση που συνδέει την στάθμη με την παροχή του ποταμού και το σχήμα τους είναι παραβολή, όταν παριστάνονται σε κανονικό χαρτί και ανάγονται σε ευθεία ή σε επιμέρους ευθύγραμμα τμήματα, όταν παριστάνονται σε διπλό λογαριθμικό χαρτί. Η μορφή $H - Q$ προτιμάται της μορφής $Q - H$ στα διαγράμματα, παρόλο που η H είναι ανεξάρτητη μεταβλητή, και αυτό διότι το H στον άξονα των τεταγμένων θυμίζει τη φυσική έννοια της στάθμης που μεταβάλλεται κατακόρυφα.

Η μαθηματική έκφραση των καμπυλών είναι $Q = a \cdot H^b$, όπου Q η παροχή, H η στάθμη, a και b οι οποίες προκύπτουν από μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Αν $H = 0$, τότε κανονικά και $Q = 0$ αλλιώς αν $Q \neq 0$, τότε για να είναι μαθηματικά ορθή η παραπάνω σχέση, εισάγουμε τον όρο H_0 και έτσι η σχέση γίνεται $Q = a \cdot (H - H_0)^b$. Αν θέλουμε να παραστήσουμε την καμπύλη σε διπλό λογαριθμικό χαρτί, τότε η μαθηματική έκφραση των καμπυλών γίνεται $\log Q = \log a + b \cdot \log(H - H_0)$. Οι παραπάνω σχέσεις δεν ορίζουν μονοσήμαντα μια καμπύλη, είναι πιθανό να ορίζεται από επιμέρους τμήματα τα οποία περιγράφονται με διαφορετικούς συντελεστές a , b και H_0 .

Οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τις καμπύλες προκύπτουν από ένα σύνολο υδρομετρήσεων με συνεχείς προσαρμογές με βάση τις μεθόδους των ελαχίστων τετραγώνων. Η σχέση μεταξύ στάθμης-παροχής είναι δύσκολο να παραμείνει αμετάβλητη ειδικά Ελλάδα που παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο στις ορεινές περιοχές. Συνήθως η μεταβλητότητα της παροχής προκύπτει από αλλαγές στο εμβαδόν της διατομής, από απότομη αλλαγή της στάθμης του νερού, από πάγωμα της επιφάνειας και από έντονη βλάστηση. Είναι επίσης δυνατό η μεταβλητότητα της παροχής να μη συμβαίνει μόνο, διότι άλλαξε η μορφή της διατομής, αλλά και για το ότι οι γειτονικές διατομές ανάντη και κατόντη της διατομής ελέγχου έχουν αλλάξει έτσι, ώστε το νέο προφίλ της ροής να είναι διαφορετικό από το προηγούμενο. Η αλλαγή της καμπύλης γίνεται μόνο όταν αλλάζουν τα χαρακτηριστικά της ροής (Λεοντόπουλος, 1997).

Οι αλλαγές αυτές περιπλέκουν αρκετά το πρόβλημα της καμπύλης, αφού δεν υπάρχει μία διαχρονική καμπύλη αλλά ένα σύνολο καμπυλών, όπου κάθε μία ισχύει για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα (μερικούς μήνες ή έτη). Σε περιπτώσεις ακραίων φαινομένων (ισχυρά

επεισόδια) όπου υπάρχουν προσωρινές (εποχιακές) αλλαγές δεν αλλάζουμε καμπύλη, απλά χρησιμοποιούμε διόρθωση Stout που θα αναφερθεί παρακάτω (Μιμίκου, Μπαλάς, 2012).

4.1.2. Επέκταση καμπύλης στάθμης - παροχής

Πολλές φορές συναντάται ένα σημαντικό πρόβλημα όταν δεν υπάρχουν υδρομετρήσεις στις περιοχές υψηλών τιμών στάθμης και παροχής, ενώ υπάρχουν καταγραφές του σταθμημέτρου ή του σταθμηγράφου κατά τη διάρκεια σημαντικών πλημμυρικών επεισοδίων. Αυτό επιτυγχάνεται με την εκτίμηση της παροχής για αυτά τα επεισόδια και με την επέκταση της καμπύλης στάθμης-παροχής.

Η επέκταση γίνεται τις πιο πολλές φορές με την εξίσωση Manning η οποία είναι:

$$Q = \frac{\sqrt{J}AR^{2/3}}{n} \quad (4.1)$$

όπου: Q = παροχή , A = εμβαδόν διατομής, R = υδραυλική ακτίνα , J = κλίση τριβών , n = συντελεστής τραχύτητας κατά Manning.

Για τον προσδιορισμό του σταθερού όρου $J^{1/2}/n$ χρησιμοποιούνται δεδομένα παροχής από τις διαθέσιμες υδρομετρήσεις. Ο σταθερός αυτός όρος υπολογίζεται με παλινδρόμηση ανάμεσα στην παροχή και στον όρο $AR^{2/3}$, όπου μπορεί να υπολογιστεί από τη γεωμετρία της συνολικής διατομής, η οποία είναι προφανώς διαθέσιμη. Εναλλακτικά, ένας άλλος τρόπος επέκτασης είναι η εξίσωση του Chezy:

$$Q = CA(RJ)^{0.5} \quad (4.2)$$

όπου:

Q = παροχή, C = σταθερά , A = εμβαδόν διατομής , R = υδραυλική ακτίνα , J = κλίση τριβών.
Έχοντας τις υψηλές υδρομετρήσεις μπορούν να σχεδιαστούν τα ζεύγη (Q , $AR^{0.5}$) που με γραμμική παλινδρόμηση βοηθούν στον προσδιορισμό του όρου $CJ^{0.5}$. Ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ των καμπυλών στάθμης-παροχής στα χαμηλά σημεία και της επέκτασης της αφορά στη συναρμογή. Η συναρμογή της καμπύλης είναι μία ευθεία γραμμή που συνδέει τα άκρα κάθε καμπύλης της ομάδας με ένα σημείο της επέκτασης ώστε να ικανοποιείται η σχέση $DQ/DH > 0$ (Μιμίκου, Μπαλάς, 2012).

4.1.3. Παρατηρήσεις - Συμπεράσματα για την καμπύλη στάθμης-παροχής

Ο σταθμός πρέπει να λειτουργεί χωρίς διακοπή για να υπάρχει συστηματική μέτρηση των παροχών, γιατί αλλιώς δεν είναι δυνατό να εντοπιστούν οι μεταβολές της καμπύλης στάθμης-παροχής. Η παραδοχή ότι η αλλαγή της καμπύλης γίνεται κατά τη διάρκεια μιας μεγάλης πλημμύρας, συμβάλει στη θεώρηση ότι η μετάβαση από μια καμπύλη στην επόμενη χρονικά συμπίπτει χρονικά με τη μέγιστη στάθμη του σταθμημέτρου του σταθμού, στην περίοδο μεταξύ των δύο μετρήσεων παροχής που ανήκουν σε δύο διαδοχικά υποσύνολα.

Σε περιπτώσεις μόνιμης ροής για μια συγκεκριμένη διατομή υδατορεύματος και μια δεδομένη χρονική περίοδο στην οποία δεν μεταβάλλεται η διατομή και τα χαρακτηριστικά του υδατορεύματος υπάρχει μια αντιστοιχία μεταξύ στάθμης-παροχής. Αυτή η αντιστοιχία δεν ισχύει στην φύση κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων που χαρακτηρίζονται από έντονες μεταβολές των χαρακτηριστικών ροής στο χρόνο.

Σε μη μόνιμη ροή η καμπύλη στάθμης-παροχής έχει διαφορετικές κλάδους ανόδου και καθόδου από τους οποίους κανένας δεν συμπίπτει με την καμπύλη ομοιόμορφης ροής. Συνήθως κατά τον υπολογισμό της χρονοσειράς της παροχής από την αντίστοιχη χρονοσειρά στάθμης αμελείται η επίδραση του φαινομένου λόγω της πολυπλοκότητας και της έλλειψης δεδομένων. Έτσι εφαρμόζεται μία αμφιμονοσήμαντη σχέση στάθμης-παροχής γεγονός που αποτελεί πηγή σφάλματος στην εκτίμηση των πλημμυρικών υδρογραφημάτων (Μιμίκου, Μπαλτάς, 2012).

4.1.4. Μέθοδος πολυγώνων Thiessen

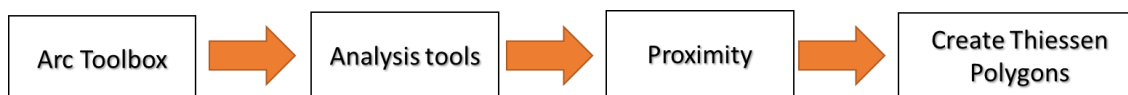
Η μέθοδος Thiessen είναι μία κλασική μέθοδος στην οποία η συνολική επιφάνεια A χωρίζεται γεωμετρικά σε ζώνες επιρροής A_i μία για κάθε σταθμό, έτσι ώστε: $\sum_{i=1}^k A_i = A$ (4.3)

Ο συντελεστής βάρους θεωρείται ανάλογος του εμβαδού της ζώνης επιρροής του σταθμού, δηλαδή: $w_i = \frac{A_i}{A}$ (4.4)

Οι ζώνες επιρροής προσδιορίζονται έτσι ώστε κάθε σημείο της ζώνης του σταθμού i να απέχει από τη θέση του σταθμού i λιγότερο απ' όσο απέχει από οποιονδήποτε άλλο σταθμό της περιοχής. Η αρχή αυτή οδηγεί άμεσα σε μια απλή γεωμετρική κατασκευή των ζωνών επιρροής βασισμένη στις μεσοκαθέτους των ευθύγραμμων τμημάτων που συνδέουν τους σταθμούς ανά ζεύγη. Έτσι προκύπτουν τα πολύγωνα Thiessen (Μιμίκου, Μπαλτάς, 2012).

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

Στην παρούσα μελέτη δημιουργήθηκαν δύο ζώνες επιρροής, μία για κάθε βροχομετρικό σταθμό. Ενώνοντας τους δύο βροχομετρικούς σταθμούς και φέρνοντας την μεσοκάθετο αυτών προσδιορίστηκαν τα πολύγωνα Thiessen. Η διαδικασία μέσω του λογισμικού ArcGis που ακολουθήθηκε φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Βήματα υπολογισμού πολυγώνων Thiessen [Πηγή: ArcGis]

Από τους υπολογισμούς προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας 4.1. Αποτελέσματα υπολογισμού πολυγώνων Thiessen [Πηγή: Ίδια επεξεργασία σε περιβάλλον ArcGis]

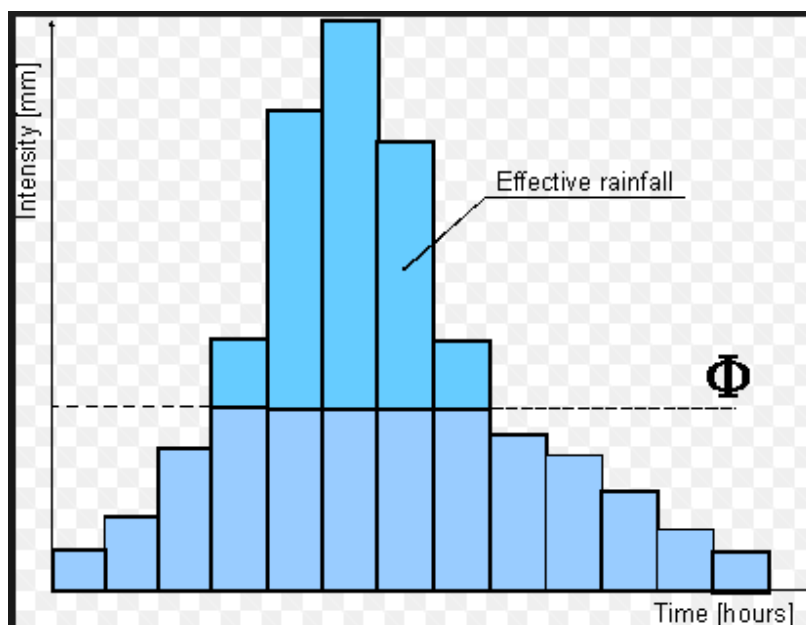
Βροχομετρικός σταθμός	Εμβαδόν A_i (km ²)	Ποσοστά Thiessen (%)
Πιάνα	192	22
Αραχαμίτες	678	78
Σύνολο	870	100

4.1.5. Δείκτης ϕ

Οι δείκτες διήθησης υποθέτουν ότι η διήθηση πραγματοποιείται με σταθερό ή μέσο ρυθμό κατά την διάρκεια της καταιγίδας. Συνήθως οι μέθοδοι αυτές τείνουν να υποεκτιμήσουν τους αρχικούς ρυθμούς διήθησης και να υπερεκτιμήσουν τους τελικούς. Καλύτερα αποτελέσματα είναι σε μεγάλες καταιγίδες και υγρά εδάφη ή σε καταιγίδες όπου οι ρυθμοί διήθησης μπορούν να θεωρηθούν σχετικά ομοιόμορφοι.

Ο πιο γνωστός δείκτης είναι ο ϕ , σύμφωνα με τον οποίο ο συνολικός όγκος απωλειών κατά την διάρκεια της καταιγίδας, κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το δείγμα του επεισοδίου. Συνεπώς, ο όγκος της κατακρήμνισης πάνω από τη γραμμή του δείκτη ϕ είναι ίσος με την απορροή. Μία παραλλαγή του δείκτη ϕ , που αποκλείει την εδαφική αποθήκευση και κατακράτηση, είναι ο δείκτης W . Αρχικές ποσότητες συχνά αφαιρούνται από τα πρώτα στάδια της καταιγίδας, έτσι ώστε να αποκλειστεί η αρχική κατακράτηση και διαβροχή.

Ο δείκτης ϕ υπολογίζεται για μια δεδομένη καταιγίδα αφού πρώτα προσδιοριστεί η ποσότητα της παρατηρημένης απορροής από το Υδρογράφημα και υπολογιστεί η διαφορά μεταξύ αυτής της ποσότητας και της συνολικά καταμετρημένης κατακρήμνισης. Ο όγκος των απωλειών κατανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος του προφίλ μιας καταιγίδας όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 4.2.



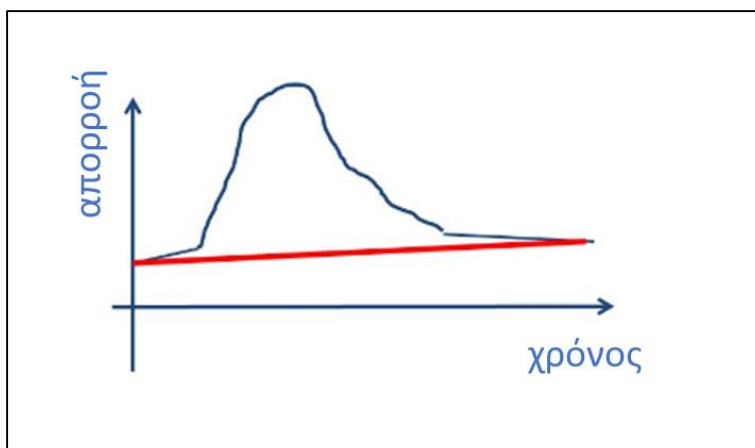
Σχήμα 4.2. Αναπαράσταση του δείκτη ϕ [Πηγή: www.epfl.ch]

Η χρήση του δείκτη ϕ για τον υπολογισμό του όγκου της άμεσης απορροής, από ένα δεδομένο προφίλ καταιγίδας, είναι στην ουσία η αντίστροφη διαδικασία. Δυστυχώς ο δείκτης ϕ που προσδιορίζεται από μια καταιγίδα δεν είναι γενικά εφαρμόσιμος σε άλλες καταιγίδες και αν δεν συσχετιστεί με τις παραμέτρους της λεκάνης απορροής έχει πολύ μικρή αξία (Μιμίκου, Μπαλάς, 2012).

4.1.6 Διαχωρισμός βασικής - άμεσης απορροής

Οι βασικές συνιστώσες (μέρη) ενός υδρογραφήματος είναι η επιφανειακή απορροή, η ενδιάμεση απορροή και η βασική απορροή. Η συνιστώσα της επιφανειακής απορροής περιλαμβάνει νερό που ρέει πάνω στην επιφάνεια του εδάφους. Η συνιστώσα της ενδιάμεσης απορροής περιλαμβάνει το νερό που κινείται πλευρικά κάτω από την επιφάνεια του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη και εκδηλώνεται μετά από κάποια απόσταση πάλι στην επιφάνεια ή απευθείας

στην κοίτη του ρεύματος. Η συνιστώσα της βασικής απορροής, περιλαμβάνει το νερό που προέρχεται από την υπόγεια ροή απ' την κορεσμένη ζώνη. Η συνιστώσα της ενδιάμεσης απορροής και της επιφανειακής απαρτίζουν την άμεση απορροή. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον διαχωρισμό βασικής – άμεσης είναι η γραμμική και φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3. Γραμμική μέθοδος υπολογισμού βασικής απορροής

4.1.7. Πορεία εξαγωγής παρατηρημένων Πλημμυρογραφημάτων

Για την εξεταζόμενη λεκάνη απορροής επιλέχθηκαν πέντε ακραία επεισόδια βροχοπτώσεων τα οποία είναι τα εξής:

6. 21/12/2011-24/12/2011 (Επεισόδιο 1)
7. 06/01/2012-09/01/2012 (Επεισόδιο 2)
8. 03/03/2013-07/03/2013 (Επεισόδιο 3)
9. 02/03/2014-04/03/2014 (Επεισόδιο 4)
10. 05/03/2015-08/03/2015 (Επεισόδιο 5)

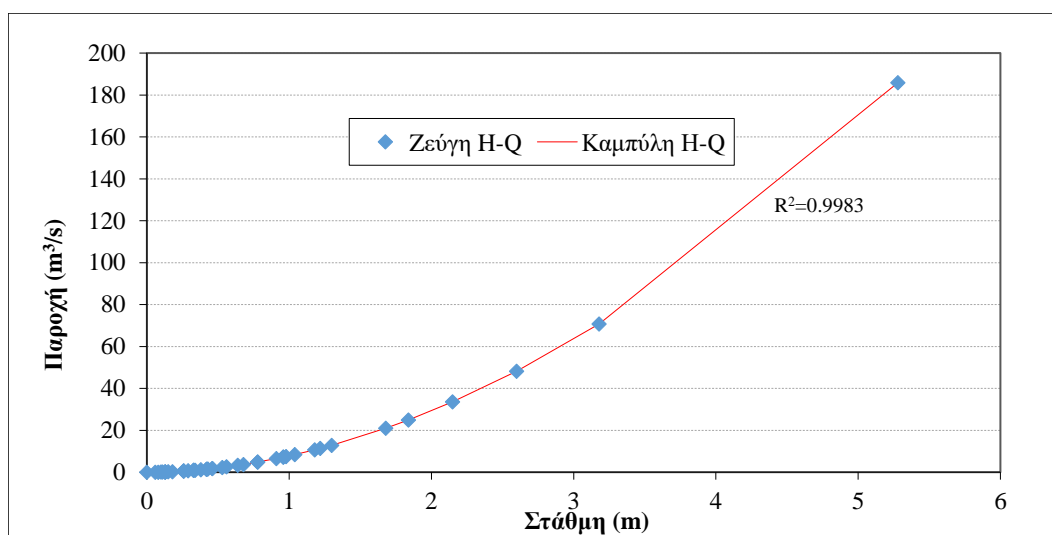
Οι στάθμες (σε m) των επεισοδίων ελήφθησαν από την Δ.Ε.Η. έπειτα από αίτημα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Οι μέγιστες τιμές της στάθμης διαφέρουν από έτος σε έτος και φτάνουν έως περίπου 7,5 μέτρα το έτος 2014, ενώ είναι μετρημένες ανά 20 λεπτά της ώρας. Για την επιλογή των επεισοδίων κριτήριο είναι η ένταση και η διάρκεια της βροχής, τα οποία βοήθησαν στην καλύτερη προσαρμογή του μοντέλου.

Για τα παραπάνω επεισόδια βρέθηκαν οι βροχές σε δύο βροχομετρικούς σταθμούς, στην Πιάνα και στους Αραχαμίτες. Ο βροχογράφος της Πιάνας έχει υψόμετρο 997 μέτρα και των

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

Αραχαμίτων 743 μέτρα. Οι βροχές του σταθμού στους Αραχαμίτες ελήφθησαν από την Δ.Ε.Η. σε ψηφιακή μορφή ανά 20 λεπτά της ώρας και σε χιλιοστά βροχής. Οι βροχές του σταθμού της Πιάνας ελήφθησαν επίσης από την Δ.Ε.Η. αλλά σε έντυπη μορφή, λόγω της μη ψηφιοποίησης τους. Από ίδια επεξεργασία οι βροχές της Πιάνας στα συγκεκριμένα επεισόδια έγιναν σε ψηφιακή μορφή. Και στις δύο περιπτώσεις έγινε αναγωγή της βροχής από τα 20 λεπτά της ώρας σε ωριαία για την εφαρμογή του μοντέλου.

Από την Δ.Ε.Η. ελήφθησαν στοιχεία υδρομετρήσεων της περιοχής Αλφειού-Καρύταινας για συγκεκριμένες ημερομηνίες και ώρες. Αυτά τα στοιχεία είναι συνολικά 44 σε αριθμό και δείχνουν σε μία συγκεκριμένη ώρα και ημερομηνία την στάθμη του ποταμού σε μέτρα και την παροχή σε κυβικά μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Οι τιμές της στάθμης έχουν μέγιστη τιμή τα 5,28 μέτρα. Έχοντας γνωστές τις στάθμες και τις παροχές μπορεί να κατασκευασθεί η καμπύλη στάθμης παροχής η οποία ακολουθεί την εξίσωση $Q = \alpha * H^\beta$, όπου $H \geq 0$. Στόχος είναι να βρεθούν οι σταθερές τιμές α , β και έπειτα η εξίσωση της καμπύλης στάθμης-παροχής. Μέσω του προγράμματος του EXCEL και ειδικότερα της εντολής solver βρέθηκαν οι τιμές των α, β , οι οποίες προέκυψαν $\alpha=7,80$ και $\beta=1,90$ (Σχήμα 4.4.).



Σχήμα 4.4. Καμπύλη στάθμης - παροχής [Πηγή: Ιδία Επεξεργασία]

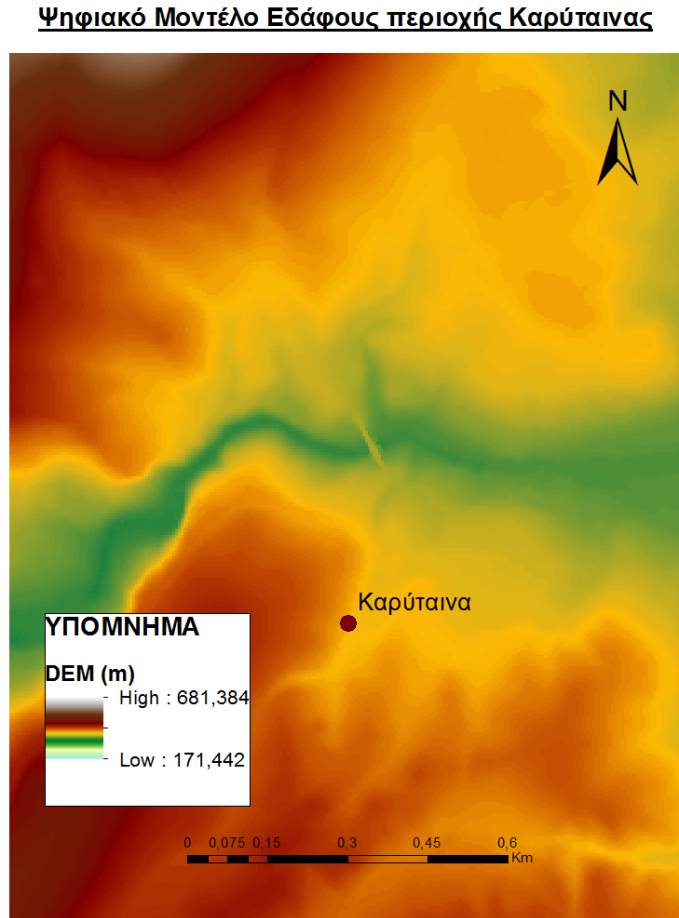
Λόγω της ύπαρξης τιμών στάθμης στα εξεταζόμενα επεισόδια μεγαλύτερες της τιμής 5,28 μέτρα κρίνεται αναγκαία η επέκταση της καμπύλης στάθμης παροχής, επειδή δεν μπορούν να υπολογιστούν οι παροχές στις μεγάλες στάθμες. Για την επέκταση απαραίτητη προϋπόθεση είναι

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

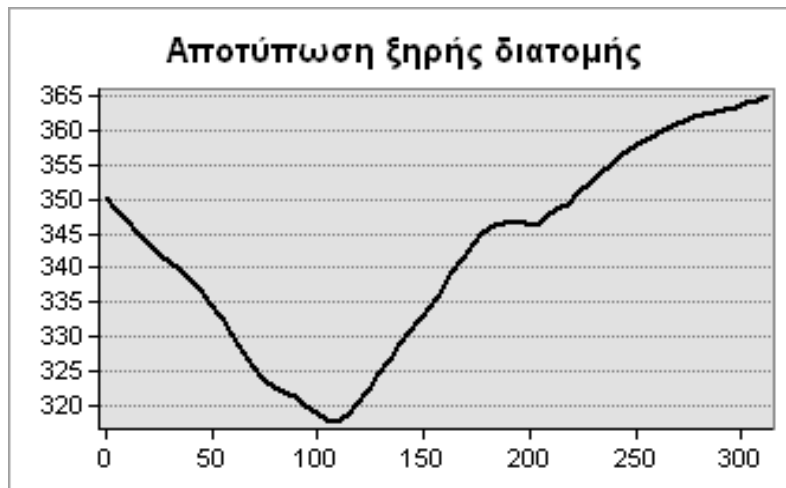
να είναι γνωστή η υγρή διατομή, δηλαδή να γίνει ακριβής αποτύπωση της κοίτης του ποταμού. Τα δεδομένα των υγρών διατομών ελήφθησαν από την Δ.Ε.Η. για δεδομένες ημερομηνίες.

Οι υγρές διατομές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παρούσα εργασία είναι χρονικά λίγο προγενέστερες των επεισοδίων. Εάν συνέβαινε το αντίθετο δεν θα υπήρχε σωστή εικόνα της κοίτης του ποταμού αφού μετά το επεισόδιο θα έχει προκληθεί πλημμύρα, η οποία θα δώσει λάθος αποτελέσματα στην υγρή διατομή. Οι υγρές διατομές αναφέρουν τον ποταμό, την τοποθεσία, την ημερομηνία της μέτρησης, την θέση της μέτρησης μετρημένη σε οριζόντια απόσταση από κάποιο σημείο αναφοράς και το βάθος του ποταμού σε κάθε θέση. Οι υγρές διατομές σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Autocad. Για την δημιουργία της κοίτης του ποταμού, απαραίτητες είναι και οι ξηρές διατομές της περιοχής της Καρύταινας, οι οποίες ελήφθησαν από το ArcGis.

Εισάγοντας στο ArcGis ένα κομμάτι του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (DEM) (Σχήμα 4.5.), το οποίο προσανατολίζεται κοντά στην περιοχή της Καρύταινας, μπορεί να απεικονιστεί η ξηρή διατομή του ποταμού. Με την εντολή interpolate line του προγράμματος ArcGis ορίζονται ευθείες κάθετα στον ποταμό που δείχνουν κάθε φορά την ξηρή διατομή, δηλαδή την αποτύπωση της κοίτης (Σχήμα 4.6.). Κάνοντας export των συντεταγμένων της ξηρής διατομής από το ArcGis στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Autocad προσαρμόζω την ξηρή διατομή με την υγρή διατομή μιας ορισμένης ημερομηνίας που εξετάζω. Τα δεδομένα από τις υγρές διατομές πρέπει να μετατραπούν για να προσαρμοστούν με την ξηρή, αφού δεν έχουν κάποια συγκεκριμένη θέση στο χώρο. Η απόσταση πρέπει να μετατραπεί στην κανονική οριζόντια απόσταση και το βάθος σε απόλυτο υψόμετρο. Οι παροχές των στάθμων που είναι μεγαλύτερες των 5,28 μέτρων είναι πλέον εύκολο να προσδιοριστούν από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Αυτά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά είναι το εμβαδόν (A), η περίμετρος (Π), η υδραυλική ακτίνα (R) και η κλίση της λεκάνης (J) και υπολογίστηκαν εύκολα για τις στάθμες άνω των 5,28 m στο Autocad.



Σχήμα 4.5. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους γύρω από τη θέση του σταθμού Καρύταινας
[Πηγή: Ιδία επεξεργασία]



Σχήμα 4.6. Παράδειγμα αποτύπωσης ξηρής διατομής στην περιοχή της Καρύταινας
[Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

Για όλες τις ημέρες των επεισοδίων έχουν πλέον υπολογιστεί οι ωριαίες παροχές και οι βροχές των σταθμών Πιάνας και Αραχαμίτες. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.2. η μέθοδος Thiessen χωρίζει την λεκάνη σε ζώνες επιρροής. Αυτές οι λεκάνες είναι δύο, όσοι και οι βροχομετρικοί σταθμοί. Η βροχή υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_i = w_1 * P_{\text{πιάνας}} + w_2 * P_{\text{αραχαμίτες}} \quad (4.5)$$

Όπου:

P_i : η ωριαία βροχόπτωση και των δύο σταθμών

w_1 : το ποσοστό επιρροής Thiessen του σταθμού της Πιάνας

w_2 : το ποσοστό επιρροής Thiessen του σταθμού των Αραχαμίτων

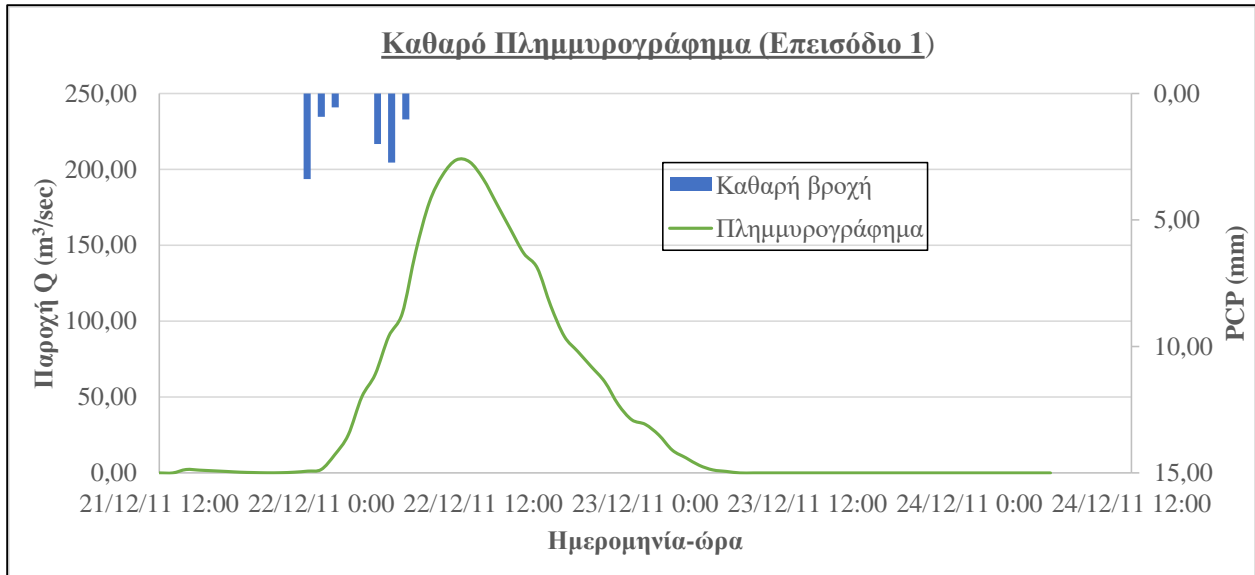
$P_{\text{πιάνας}}$: η ωριαία βροχή της Πιάνας

$P_{\text{αραχαμίτες}}$: η ωριαία βροχή των Αραχαμίτων

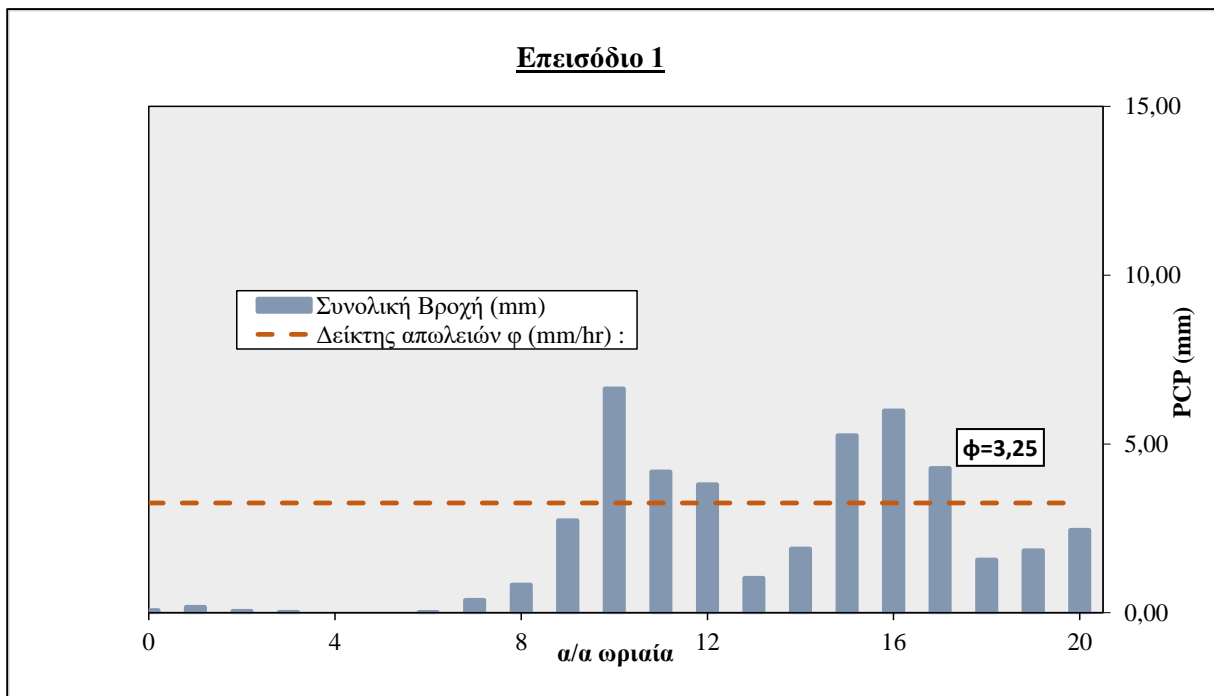
Στην συνέχεια βρέθηκε η καθαρή βροχή και η καθαρή απορροή για τον υπολογισμό των πλημμυρογραφήματων. Η βασική απορροή υπολογίστηκε γραμμικά και δημιουργήθηκαν τα καθαρά πλημμυρογραφήματα.

Η καθαρή βροχή υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4.3. από τον δείκτη ϕ . Για τον υπολογισμό του ϕ στο EXCEL δημιουργήθηκε στήλη καθαρής απορροής και βρέθηκε το άθροισμά της. Έτσι βρίσκεται ο όγκος νερού που πέφτει και διαιρεμένος με την έκταση της λεκάνης προκύπτουν χιλιοστά βροχής. Υπολογίζοντας στην συνέχεια την επιφανειακή απορροή διαμορφώνεται ο κατάλληλος αριθμός ϕ μέσω της εντολής goal seek.

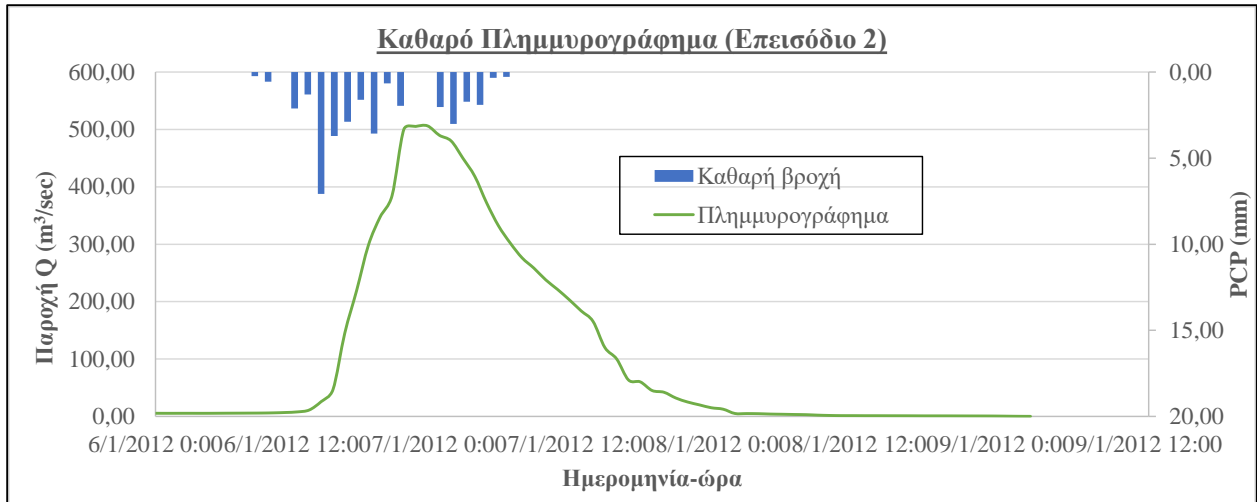
Τα 5 τελικά πλημμυρογραφήματα των επεισοδίων καθώς και οι καθαρές βροχές, όπως επίσης η συνολική βροχή με τον δείκτη ϕ παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.



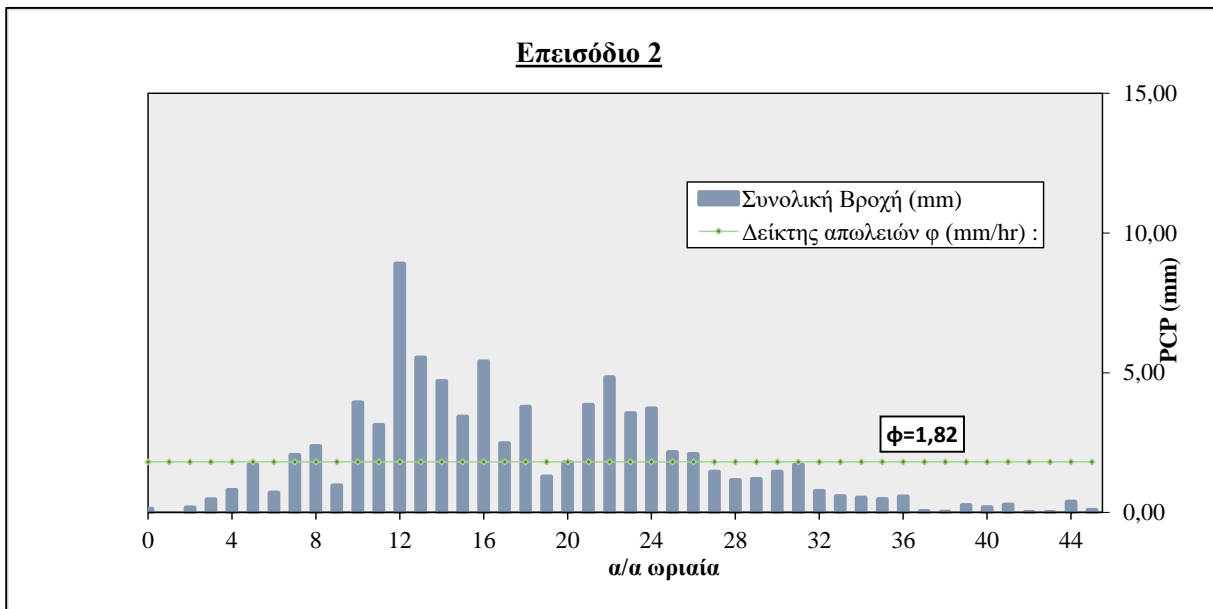
Σχήμα 4.7. Καθαρό πλημμυρογράφημα Επεισοδίου 1



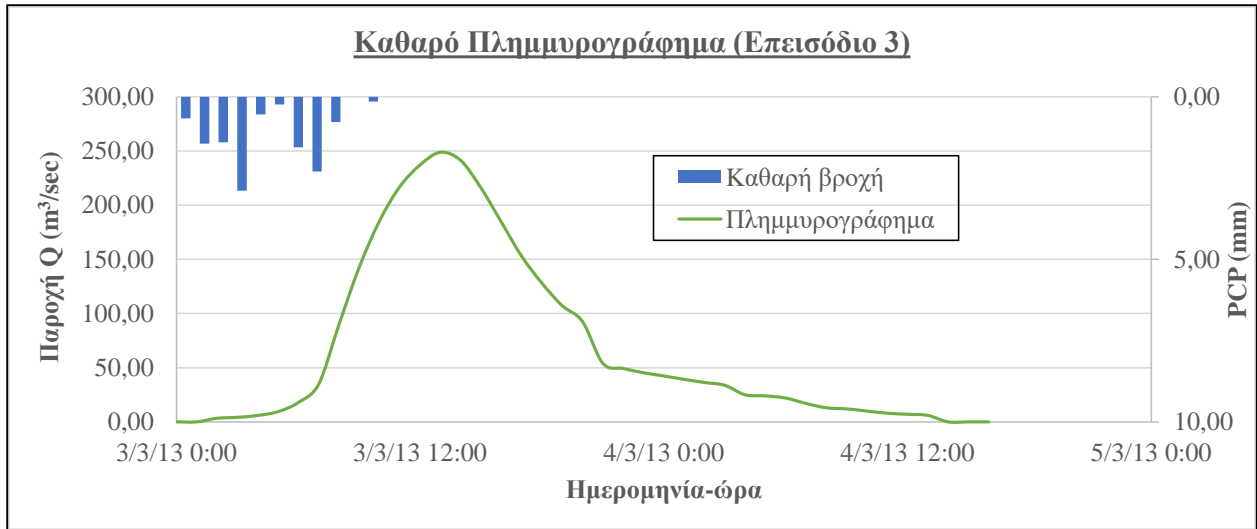
Σχήμα 4.8. Συνολική βροχόπτωση και δείκτης φ Επεισοδίου 1



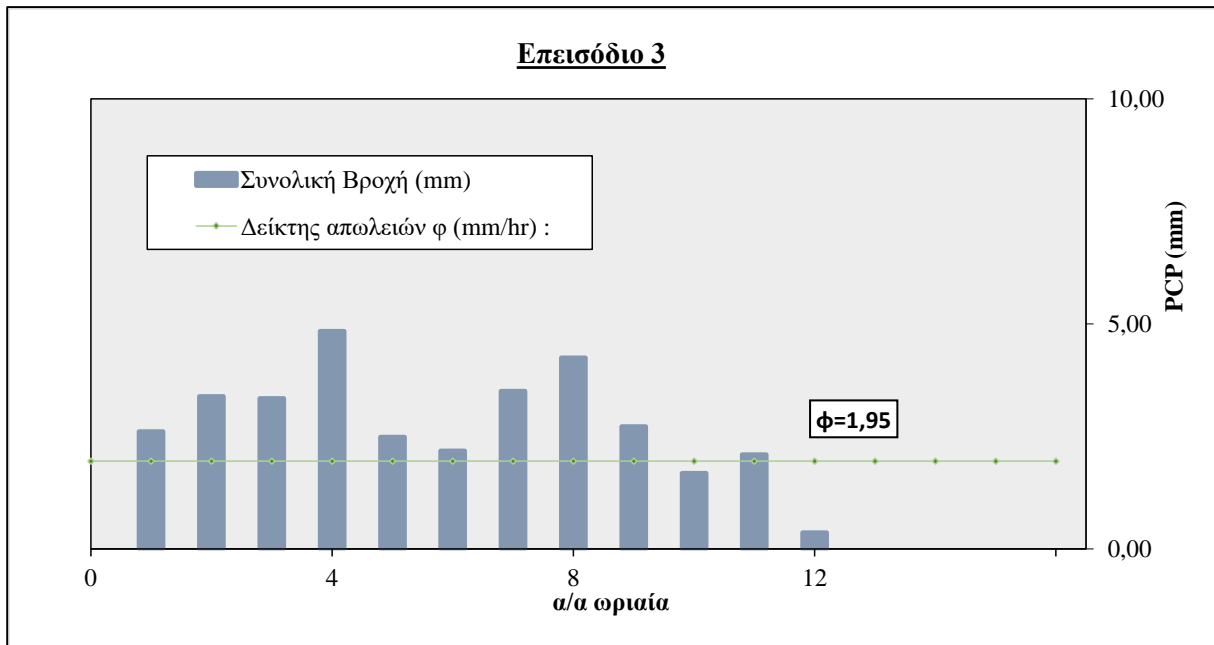
Σχήμα 4.9. Καθαρό πλημμυρογράφημα Επεισοδίου 2



Σχήμα 4.10. Συνολική βροχόπτωση και δείκτης φ Επεισοδίου 2

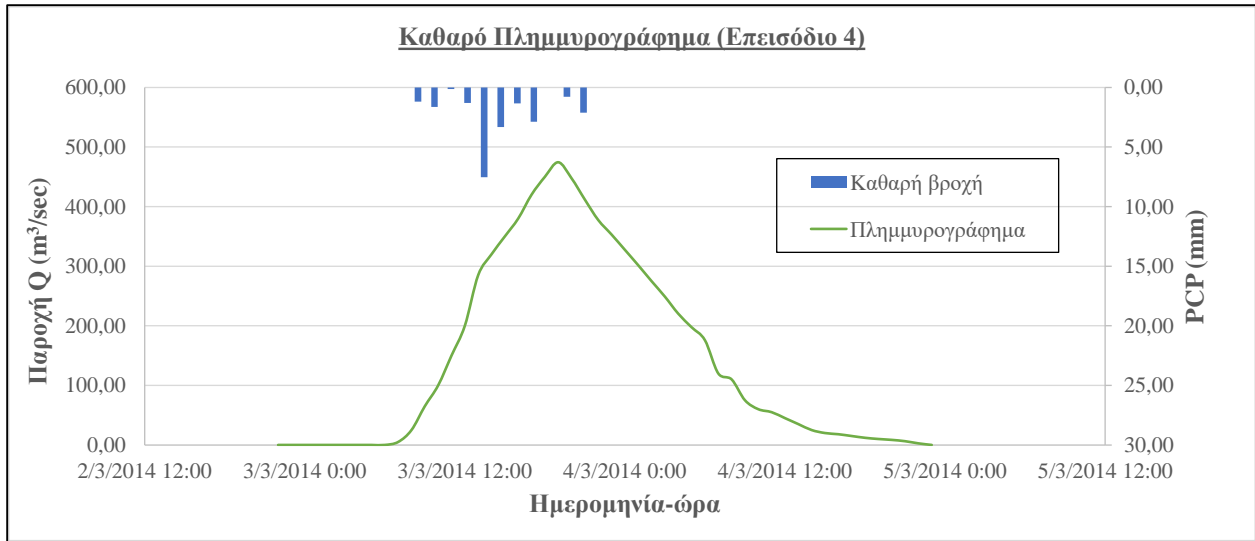


Σχήμα 4.11. Καθαρό πλημμυρογράφημα Επεισοδίου 3

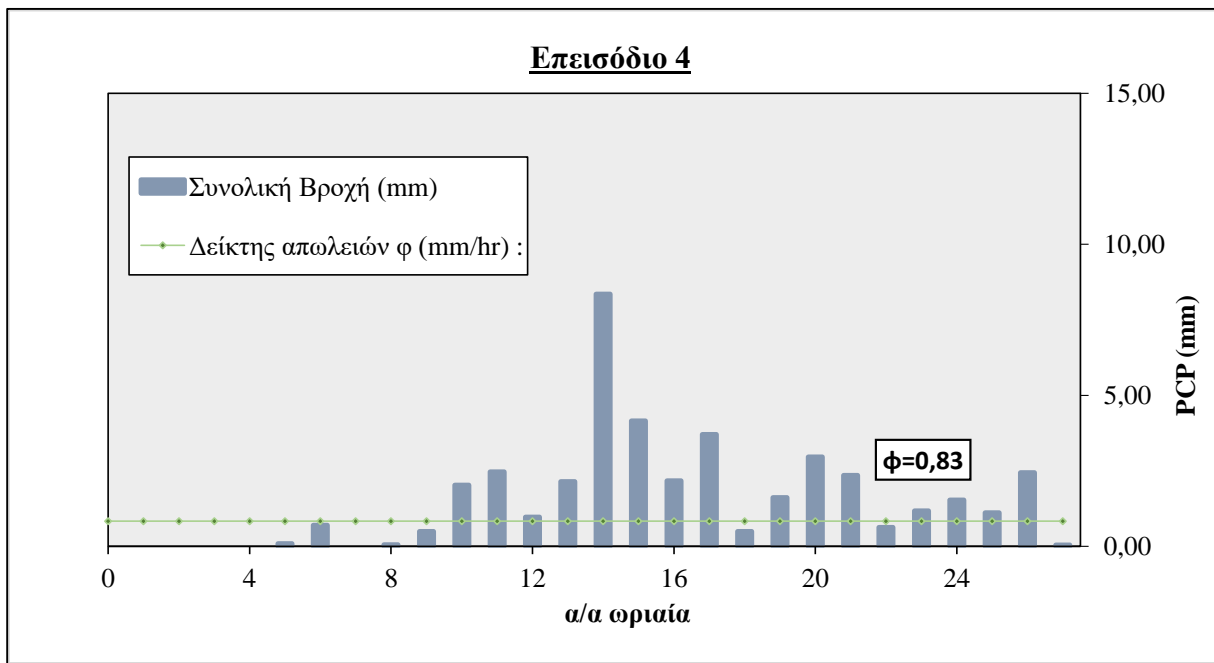


Σχήμα 4.12. Συνολική βροχόπτωση και δείκτης φ Επεισοδίου 3

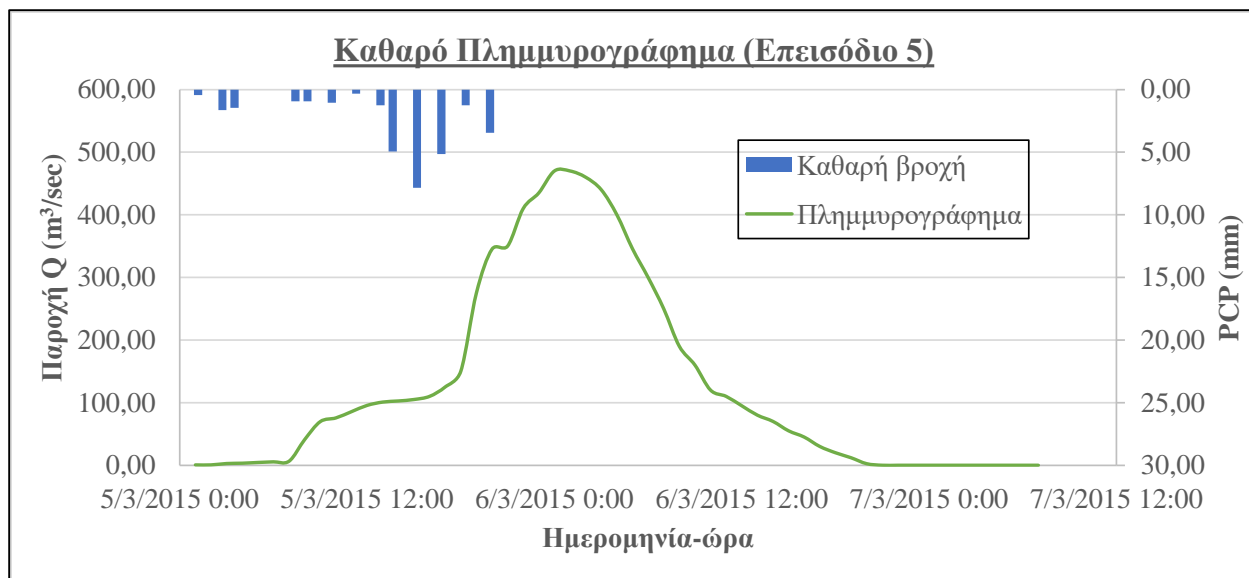
Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία



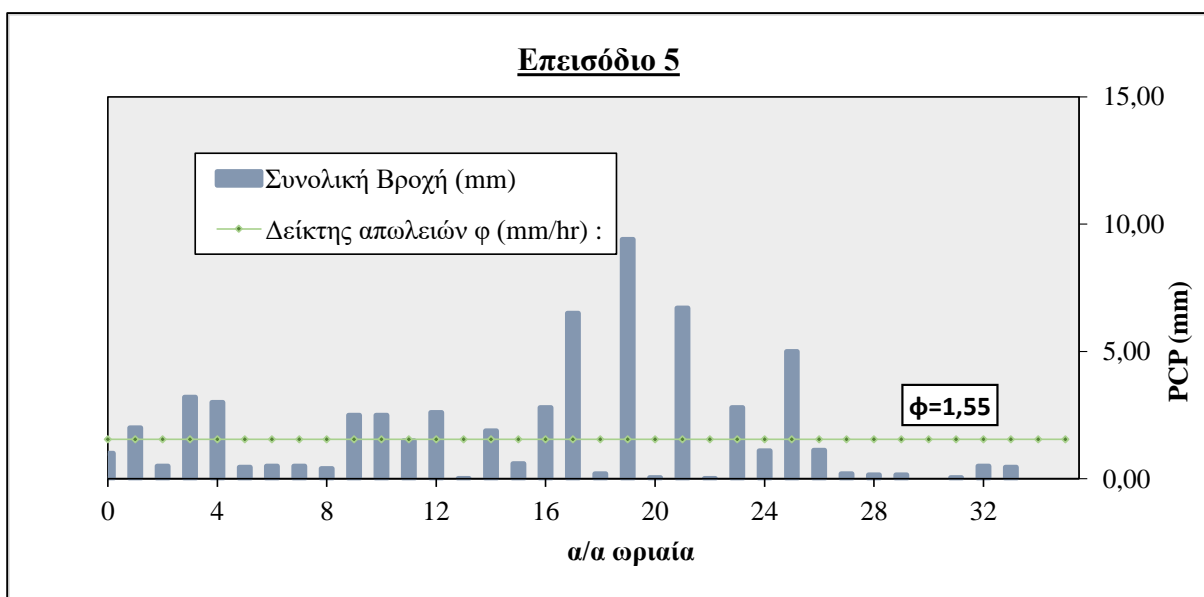
Σχήμα 4.13. Καθαρό πλημμυρογράφημα Επεισοδίου 4



Σχήμα 4.14. Συνολική βροχόπτωση και δείκτης φ Επεισοδίου 4



Σχήμα 4.15. Καθαρό πλημμυρογράφημα Επεισοδίου 5



Σχήμα 4.16. Συνολική βροχόπτωση και δείκτης ϕ Επεισοδίου 5

4.2. Ψηφιακό μοντέλο (GIS) Μοναδιαίου Υδρογραφήματος με την μέθοδο του Clark's.

Το συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα με την μέθοδο του Clark's λαμβάνει υπόψη το περιστατικό μιας μοναδιαίας πλεονάζουσας βροχής (1 mm) πάνω από την λεκάνη απορροής. Η

τεχνική απαιτεί τον υπολογισμό τριών παραμέτρων: α) τον χρόνο συγκέντρωσης (T_c), β) τον συντελεστή αποθήκευσης-εξασθένησης, γ) το ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας της λεκάνης, για τον υπολογισμό της απορροής (Anastasiadis et al., 2013).

4.2.1. Χρόνος συγκέντρωσης

Ο χρόνος συγκέντρωσης (T_c) είναι ο χρόνος που απαιτείται για μια σταγόνα βροχής να ταξιδέψει από το πιο απομακρυσμένο υδρολογικά σημείο της λεκάνης στην έξοδό της. Έχουν υπάρξει πολλές σχέσεις για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης (T_c) όπως για παράδειγμα του Kerby-Kirpich. Εξαιτίας της απλότητας των παραμέτρων επιλέχθηκε η SCS-lag σχέση, η οποία είναι η εξής:

$$T_c = \frac{T_{lag}}{0.6} \quad (4.6), \quad \text{όπου} \quad T_{lag} = \frac{L^{0.8} \times \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{190 \times S^{0.5}} \quad (4.7)$$

Ο χρόνος συγκέντρωσης (T_c) μετριέται σε ώρες (hours), η μακρύτερη διαδρομή ροής στην λεκάνη απορροής (L) μετριέται σε πόδια (feet), CN είναι ο μέσος όρος των τιμών του Curve Number της λεκάνης (αδιάστατο) και S η μέση τιμή των κλίσεων της λεκάνης (m/m). Η μακρύτερη διαδρομή ροής υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα εργαλεία του Arc Hydro. Το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM), όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 του τεύχους έχει σφάλματα λόγω της ανάλυσης των δεδομένων. Αυτές οι ταπεινώσεις ή βυθίσματα (sinks) πρέπει να διορθωθούν για να εξασφαλιστεί η ορθότητα των λεκανών και των υδατικών δικτύων. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το γέμισμα (fill), το οποίο εξαλείφει όλες τις ταπεινώσεις που υπάρχουν στο DEM. Στην συνέχεια υπολογίστηκε η διεύθυνση ροής (flow direction), η οποία μας δίνει την κατεύθυνση της ροής του κάθε φατνίου. Τέλος, υπολογίστηκε το μήκος ροής το οποίο δέχτηκε ως δεδομένο της διεύθυνση της ροής (flow direction) που βρέθηκε προηγουμένως. Η μέγιστη τιμή του εργαλείου flow length είναι η μακρύτερη διαδρομή ροής και ισούται με 60.358 m = 198.024 feet.

Η μέση τιμή των κλίσεων της λεκάνης λαμβάνεται απευθείας από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) και ισούται με 10,88%.

Ο Curve Number (CN) είναι μία εμπειρική παράμετρος που χρησιμοποιείται στην Υδρολογία για την πρόβλεψη της άμεσης απορροής ή της διεύθυνσης μιας βροχόπτωσης. Η μέθοδος του

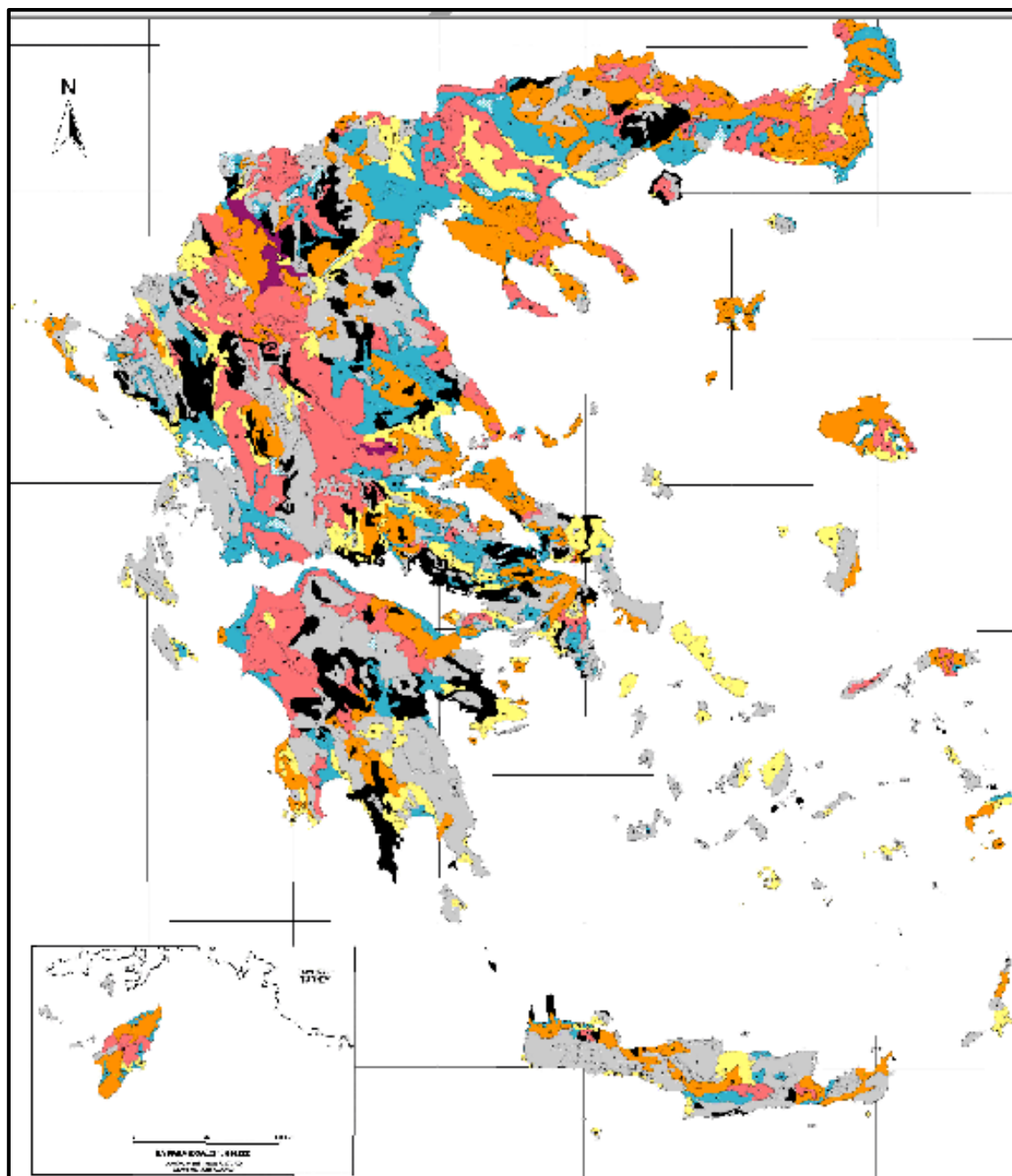
Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

Curve Number αναπτύχθηκε από το USDA Natural Resources Conservation Service, η οποία παλαιότερα ονομάζοταν Soil Conservation Service ή SCS. Παίρνει τιμές από 30 μέχρι 100. Τα χαμηλότερα νούμερα κοντά στον αριθμό 30 δείχνουν χαμηλή δυναμική απορροή, ενώ τα υψηλότερα υψηλή δυναμική απορροή. Σχετίζεται με τους διάφορους τύπους εδαφών, με την ικανότητα διήθησης του εδάφους, τη χρήση γης και με το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα. Όσο πιο χαμηλός είναι ο CN, τόσο πιο διαπερατό είναι το έδαφος (Schiariti et al., 2008).

Υπολογίζοντας την παρακάτω αριθμό: $S = \frac{1000}{CN} - 10$, η παραπάνω σχέση (4.7) του Plag παίρνει άλλη μορφή και γίνεται: $Plag = \frac{L^{0.8} * (S+1)^{0.7}}{1900 * (\%slope)^{0.5}}$ (4.8), η οποία είναι και η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του Plag. Plag είναι ο χρόνος υστέρησης και ορίζεται ως η χρονική διαφορά ανάμεσα στα κέντρα βάρους του Υδρογραφήματος άμεσης απορροής και του ενεργού βροχογραφήματος.

Η εύρεση του σωστού Curve Number που θα χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο είναι μία δύσκολη υπόθεση. Απαιτούνται δοκιμές του αριθμού αυτού για να βρεθεί ο κατάλληλος που να προσομοιάζει αρκετά την πραγματικότητα. Η υπόθεση που κάνουμε ότι ο τελικός Curve Number είναι ο μέσος όρος όλων των αριθμών Curve της λεκάνης, ανάλογα με τον τύπο εδάφους δεν είναι απόλυτα σωστή, γιατί δεν συμπεριφέρονται όλα τα εδάφη με τον ίδιο τρόπο. Απαιτείται δηλαδή μία επαναληπτική διαδικασία, έτσι ώστε να βρεθεί ο κατάλληλος και ο πιο αξιόπιστος αριθμός για το μοντέλο.

Για τον υπολογισμό του CN χρειάζεται επομένως, ο χάρτης με τους διάφορους τύπους εδαφών της Ελλάδας (Σχήμα 4.17.). Ο χάρτης δημιουργήθηκε σε περιβάλλον ArcView GIS για λογαριασμό του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Στον χάρτη το κάθε χρώμα συμβολίζει τον τύπο του εδάφους και ο κάθε τύπος εδάφους έχει υποδιαιρέσεις ανάλογα με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά. Οι παράγοντες που μεταβάλλονται είναι το μητρικό υλικό, η ποιότητα εδάφους, η ευαισθησία ερημοποίησης καθώς και οι εδαφοπονικές χρήσεις.



Σχήμα 4.17. Χάρτης εδαφικών ενώσεων Ελλάδας

[Πηγή: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ν. Γιάσογλου, 2004]

Στον παρακάτω Πίνακα 4.2. έχουν διαχωριστεί οι εδαφικές ενώσεις, οι οποίες υπάρχουν στην υπό εξέταση λεκάνη απορροής. Ο Πίνακας δείχνει όλες τις ονομασίες με αριθμητική σειρά καθώς και χαρακτηριστικά τους. Παρατηρείται ότι διαφέρουν ως προς το μητρικό υλικό, την

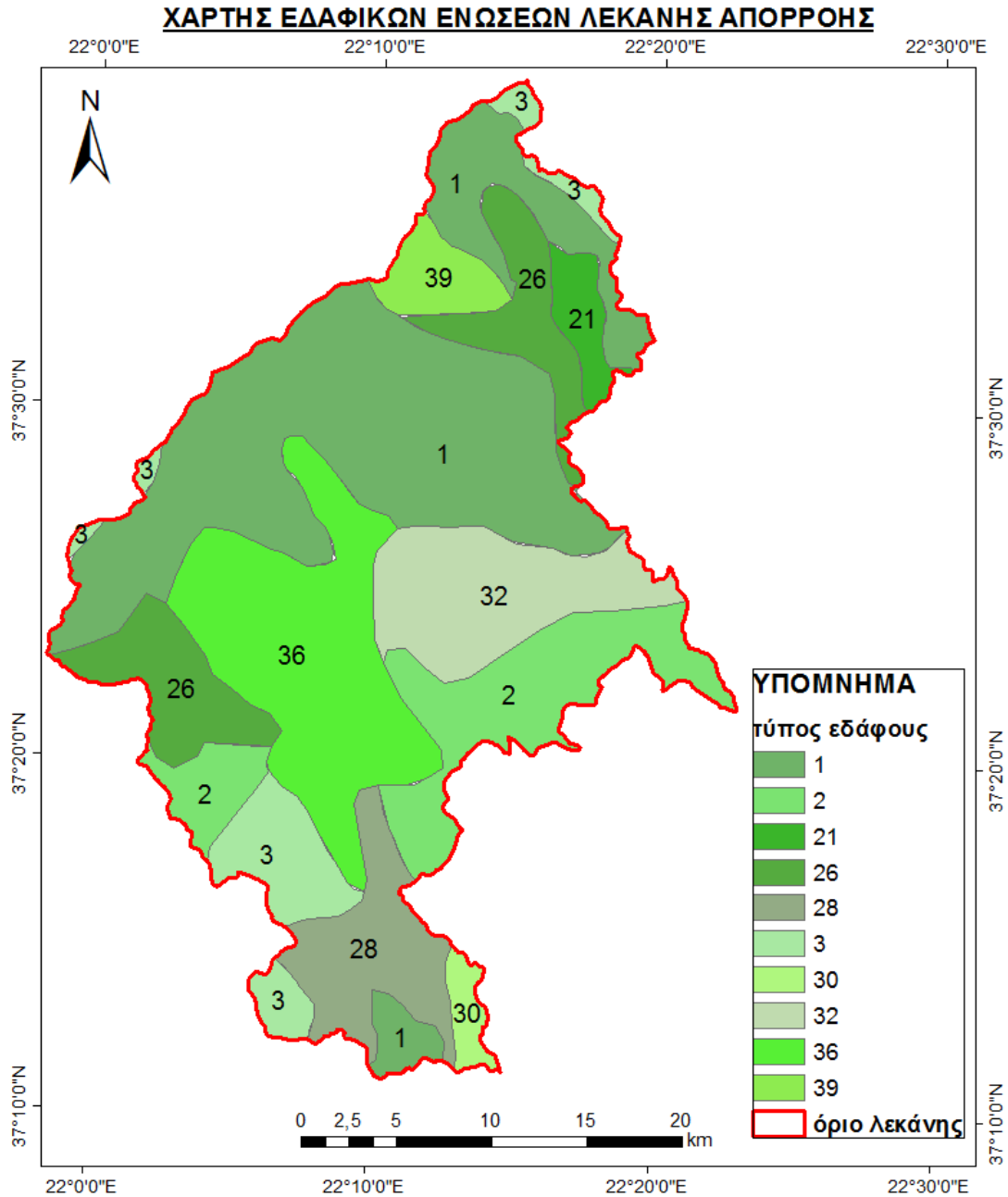
Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

ποιότητα και την ευαισθησία ερημοποίησης ανάλογα με την κάθε κατηγορία και υποκατηγορία. Αυτό συμβαίνει λόγω των ξεχωριστών ιδιοτήτων των εδαφών.

Πίνακας 4.2. Ονομασία και αρίθμηση τύπου εδάφους και περιγραφή τους στην λεκάνη απορροής [Πηγή: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ν. Γιάσογλου, 2004]

Ονομασία και αρίθμηση	Περιγραφή εδάφους
1. Rock Outcrops	μητρικό υλικό: διάφορα πετρώματα, ποιότητα: χαμηλότατη ευαισθησία ερημοποίησης: πολύ υψηλή, άγρια φύση
2. Leptosols (LP)	μητρικό υλικό: ασβεστόλιθος, ποιότητα: χαμηλότατη ευαισθησία ερημοποίησης: πολύ υψηλή, άγρια φύση
3. Leptosols (LP)	μητρικό υλικό: ασβεστόλιθος, ποιότητα: χαμηλή ευαισθησία ερημοποίησης: πολύ υψηλή, δάσος ελεγχόμενη βοσκή
21. Fluvisols (FL)	μητρικό υλικό: ολόκαινο αλλούβιο με αναβαθμούς, ποιότητα: πολύ υψηλή, ευαισθησία ερημοποίησης: χαμηλή, γεωργία
26. Fluvisols (FL)	μητρικό υλικό: ασβεστόλιθος, ποιότητα: μέτρια-χαμηλή, ευαισθησία ερημοποίησης: υψηλή, δάσος ελεγχόμενη βοσκή
28. Cambisols (CM)	μητρικό υλικό: ασβεστόχα κροκαλοπαγή, ποιότητα: μέτρια, ευαισθησία ερημοποίησης: μέτρια, δάσος ελεγχόμενη βοσκή
30. Cambisols (CM)	μητρικό υλικό: φλύσχης, σχιστόλιθοι, ποιότητα: μέτρια, ευαισθησία ερημοποίησης: υψηλή, δάσος ελεγχόμενη βοσκή
32. Cambisols (CM)	μητρικό υλικό: γρανίτες, φλύσχης, σχιστόλιθοι, ποιότητα: μέτρια, ευαισθησία ερημοποίησης: υψηλή, δάσος ελεγχόμενη βοσκή
36. Luvisols (LV)	μητρικό υλικό: ασύνδετες τριτογενείς αποθέσεις, ποιότητα: υψηλή, ευαισθησία ερημοποίησης: μέτρια, γεωργία
39. Luvisols (LV)	μητρικό υλικό: φλύσχης, σχιστόλιθος, γνεύσιος, ποιότητα: μέτρια, ευαισθησία ερημοποίησης: μέτρια, γεωργία

Ο παρακάτω χάρτης (Σχήμα 4.18), δείχνει σχηματικά τις εδαφικές ενώσεις στην λεκάνη απορροής.



Σχήμα 4.18. Χάρτης εδαφικών ενώσεων λεκάνης απορροής

[Πηγή: Ίδια επεξεργασία]

Στην συνέχεια γίνεται η αντιστοίχιση αυτών των εδαφών, με τις τέσσερις υδρολογικές εδαφικές ομάδες που όρισε η NRCS για τον υπολογισμό του Curve Number. Αυτές οι τέσσερις ομάδες είναι οι εξής:

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

- Ομάδα Α: Τα εδάφη σε αυτήν την κατηγορία έχουν χαμηλή δυναμική απορροή όταν είναι βρεγμένα. Το νερό μεταδίδεται ελεύθερα μέσα στο έδαφος. Τα εδάφη στην ομάδα Α έχουν λιγότερο από 10% άργιλο και περισσότερο από 90% άμμο ή χαλίκι. Μερικά εδάφη έχουν αργιλώδη άμμο, αμμώδη πηλό και πάνω από 35% κομμάτια βράχων.
- Ομάδα Β: Τα εδάφη σε αυτήν την κατηγορία έχουν μέτρια δυναμική απορροή όταν είναι βρεγμένα. Η μεταφορά του νερού μέσα στο έδαφος γίνεται ανεμπόδιστα. Τα εδάφη στην ομάδα Β έχουν άργιλο μεταξύ του 10%-20% και άμμο μεταξύ του 50%-90%. Μερικά εδάφη που έχουν μάργες μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτήν την κατηγορία καθώς επίσης και κάποια τα οποία έχουν μικρή πυκνότητα και πάνω από 35% κομμάτια βράχων.
- Ομάδα Γ: Τα εδάφη σε αυτήν την κατηγορία έχουν μετρίως υψηλή δυναμική απορροή όταν είναι καλά βρεγμένα. Η μεταφορά του νερού είναι κάπως περιορισμένη. Τα εδάφη στην ομάδα Γ έχουν πηλό μεταξύ του 20%-40% και λιγότερο από 50% άμμο. Μερικά εδάφη που έχουν πηλό με λάσπη ή υφές από άργιλο και άμμο μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτήν την ομάδα.
- Ομάδα Δ: Τα εδάφη σε αυτήν την κατηγορία έχουν υψηλή δυναμική απορροή όταν είναι καλά βρεγμένα. Η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος είναι περιορισμένη ή πολύ περιορισμένη. Τα εδάφη στην ομάδα Δ έχουν μεγαλύτερο από 40% άργιλο και λιγότερο από 50% άμμο. Όλα τα εδάφη με βάθος νερού μικρότερο από 50 εκατοστά ανήκουν επίσης στην κατηγορία Δ.

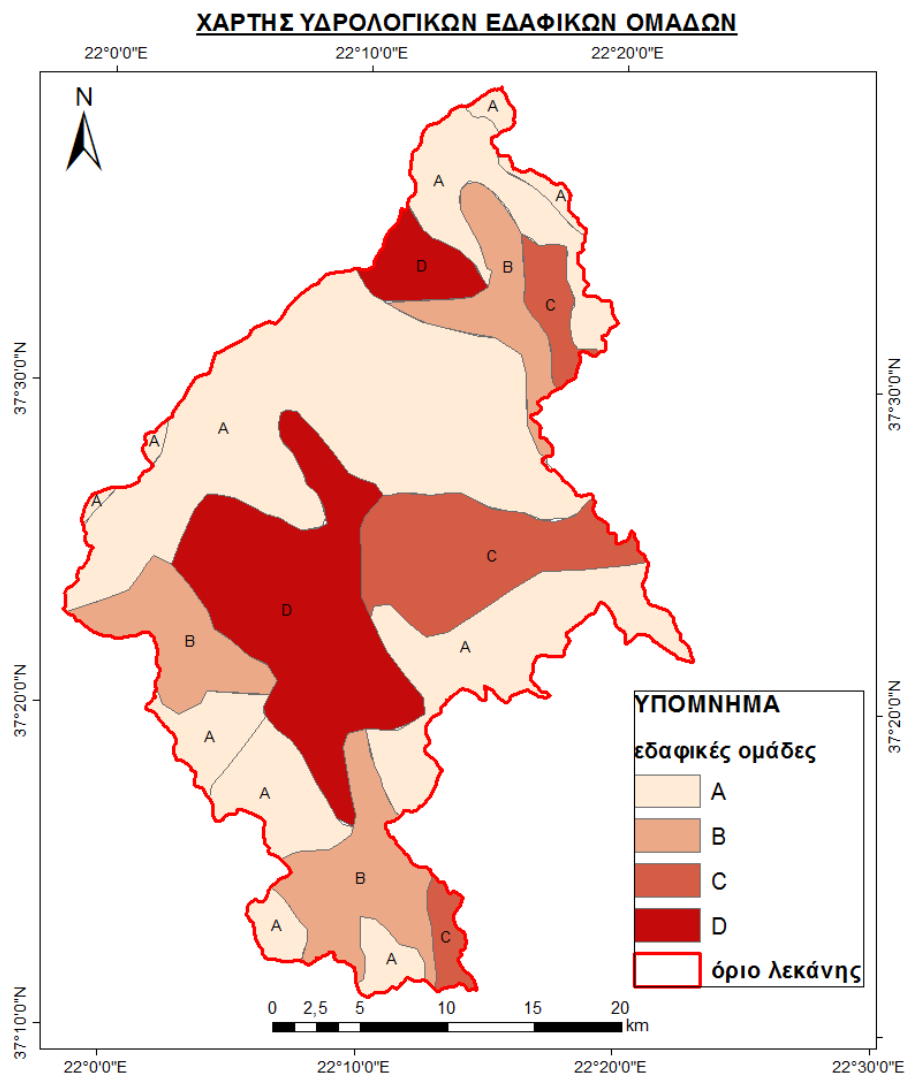
Για παράδειγμα, η κατηγορία 1. Rock Outcrops (βράχοι) έχει διάφορα πετρώματα για μητρικό υλικό, χαμηλής ποιότητας και υψηλή ευαισθησία ερημοποίησης. Συσχετίζεται με την κατηγορία Α αφού το νερό εκεί κινείται ελεύθερα μέσα στο έδαφος, υπάρχουν βράχοι σε ποσοστό 35% και αποτελούνται εξ' ολοκλήρου από άμμο ή χαλίκι. Αντίστοιχα έγιναν οι συσχετίσεις και των άλλων ομάδων και τα αποτελέσματα είναι στο Πίνακα 4.3.

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

Πίνακας 4.3. Αντιστοίχιση Κατηγοριών εδάφους με Ομάδες [Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

Αντιστοίχιση										
Κατηγορίες	1	2	3	21	26	28	30	32	36	39
Ομάδες	A	A	A	C	B	B	C	C	D	D

Οι τέσσερις υδρολογικά εδαφικές Ομάδες (A, B, C, D,) φαίνονται στο Σχήμα 4.19.



Σχήμα 4.19. Χάρτης υδρολογικών εδαφικών ομάδων λεκάνης απορροής

[Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

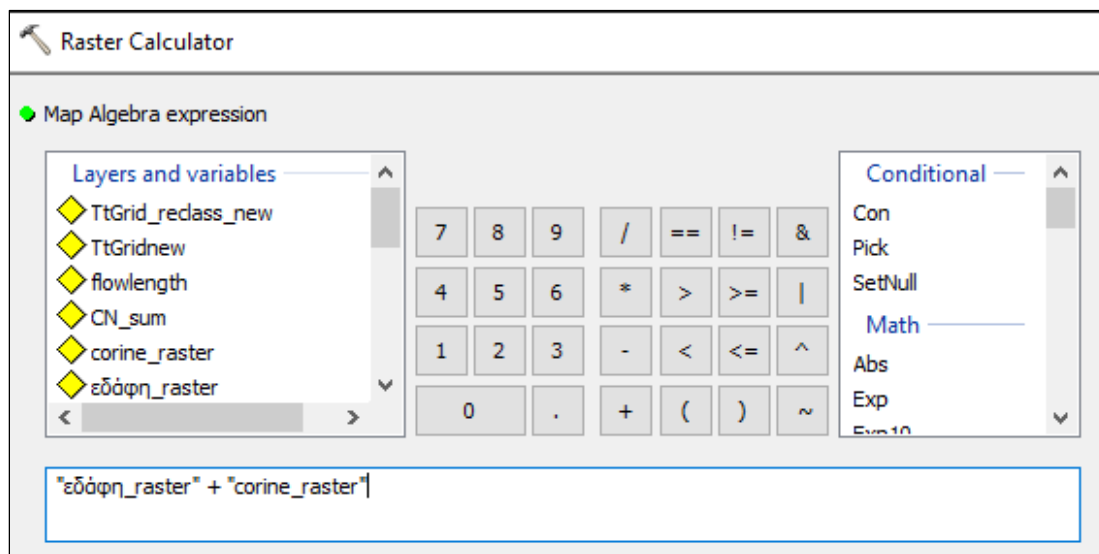
Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 του τεύχους οι χρήσεις γης προήλθαν από το Corine Land Cover 2000. Στον Πίνακα 4.4. φαίνεται το ποσοστό επιφάνειας που καταλαμβάνουν οι χρήσεις γης καθώς και ένας αριθμός δίπλα σε κάθε χρήση που δείχνει την κωδικοποίησή τους. Η κωδικοποίηση προήλθε από τους πίνακες του Curve Number (Schiariti et al., 2008) που δείχνουν διάφορες χρήσεις γης συναρτήσει με τον αριθμό CN για τις τέσσερις υδρολογικά εδαφικές ομάδες (A,B,C,D).

Πίνακας 4.4. : Ποσοστό χρήσεων γης και κωδικοποίηση [Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

Χρήση γης	Ποσοστό επιφάνειας (%)	Κωδικοί
Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0,40	1
Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0,08	2
Οδικά, σιδηροδρομικά δίκτυα	0,31	3
Χώροι εξορύξεως ορυκτών	3,12	7
Χώροι οικοδόμησης	0,11	4
Μη αρδύσιμη-αρδύσιμη γη	2,34	5
Αμπελώνες	0,06	6
Ελαιώνες	0,47	6
Λιβάδια	0,20	5
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	7,61	6
Κυρίως γεωργία με φυσική βλάστηση	20,39	6
Δάσος πλατύφυλλων	9,42	7
Δάσος κωνοφόρων	10,68	7
Μικτό δάσος	2,06	7
Φυσικοί βοσκότοποι	16,08	5
Σκληροφυλλική βλάστηση	11,76	5
Μεταβατικές δασώσεις, θαμνώδεις εκτάσεις	14,73	5
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0,07	7
Εκτάσεις με αραιά βλάστηση	0,10	7
ΣΥΝΟΛΟ	100	

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν στο ArcGis δύο αρχεία raster με δεδομένα εισόδου (input) το Corine και τους τύπους εδαφών. Με την εντολή Raster Calculator (Σχήμα 4.20.) υπολογίστηκε το άθροισμα των δύο raster δημιουργώντας ένα νέο raster υπολογισμού του CN.



Σχήμα 4.20. Άθροιση των δύο raster μέσω raster calculator [Πηγή: Ίδια επεξεργασία]

Ο Πίνακας 4.5. έχει στον οριζόντιο άξονα τις διάφορες χρήσεις γης (αστική οικοδόμηση, δάση κτλ.) που μπορεί να συναντήσει κάποιος σε μια λεκάνη απορροής, και στον κατακόρυφο τις τέσσερις υδρολογικά εδαφικές ομάδες. Με αντιστοίχιση αυτών των δύο αξόνων προκύπτει ο αριθμός CN, ένας για κάθε αντιστοίχιση. Από το ArcGis για κάθε αντιστοίχιση υπάρχει ο αριθμός των κελιών δηλαδή το εμβαδόν της κάθε αντιστοίχισης στην λεκάνη απορροής. Πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό των κελιών με το κάθε διαφορετικό CN κατά περίπτωση προκύπτει το ποσοστό επιρροής του κάθε CN στην λεκάνη απορροής. Βρίσκοντας τέλος το μέσο όρο αυτών των CN προκύπτει ο πραγματικός αριθμός CN ο οποίος είναι περίπου 81.

Πίνακας 4.5. Περιγραφή χρήσεων γης και Curve Number για τις διάφορες εδαφικές ομάδες.

[Πηγή: engineering.purdue.edu]

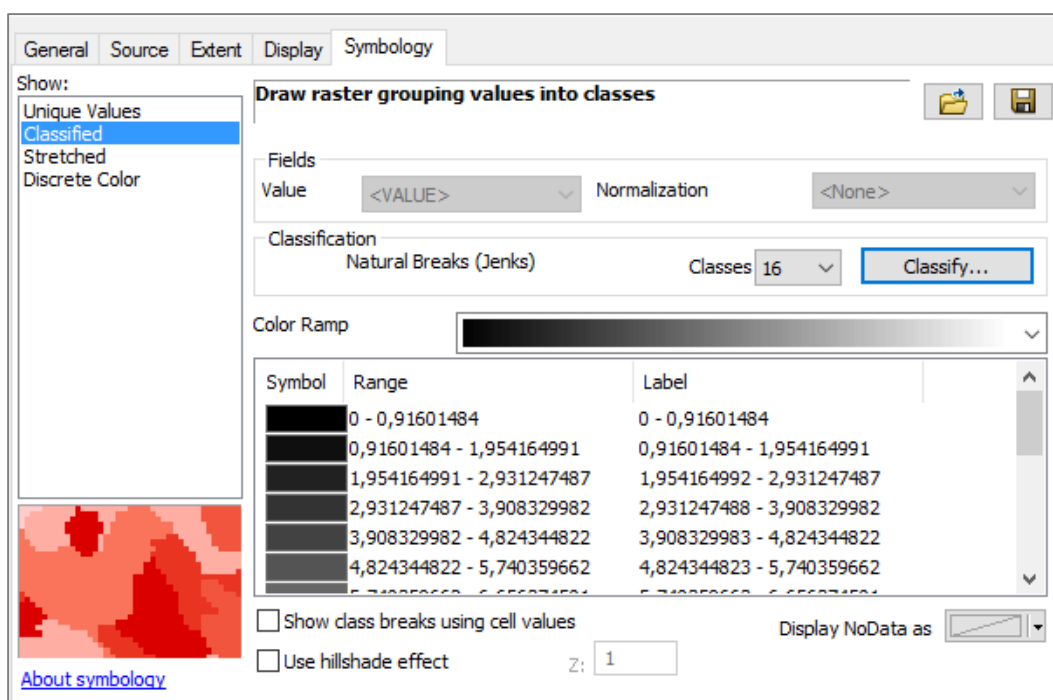
Land Use Description on Input Screen	Description and Curve Numbers from TR-55					
	Cover Description		Curve Number for Hydrologic Soil Group			
	Cover Type and Hydrologic Condition	% Impervious Areas	A	B	C	D
Agricultural	Row Crops - Straight Rows + Crop Residue Cover-Good Condition ⁽¹⁾		64	75	82	85
Commercial	Urban Districts: Commercial and Business	85	89	92	94	95
Forest	Woods ⁽²⁾ - Good Condition		30	55	70	77
Grass/Pasture	Pasture, Grassland, or Range ⁽³⁾ - Good Condition		39	61	74	80
High Density Residential	Residential districts by average lot size: 1/8 acre or less	65	77	85	90	92
Industrial	Urban district: Industrial	72	81	88	91	93
Low Density Residential	Residential districts by average lot size: 1/2 acre lot	25	54	70	80	85
Open Spaces	Open Space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) ⁽⁴⁾ Fair Condition (grass cover 50% to 70%)		49	69	79	84
Parking and Paved Spaces	Impervious areas: Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way)	100	98	98	98	98
Residential 1/8 acre	Residential districts by average lot size: 1/8 acre or less	65	77	85	90	92
Residential 1/4 acre	Residential districts by average lot size: 1/4 acre	38	61	75	83	87
Residential 1/3 acre	Residential districts by average lot size: 1/3 acre	30	57	72	81	86
Residential 1/2 acre	Residential districts by average lot size: 1/2 acre	25	54	70	80	85
Residential 1 acre	Residential districts by average lot size: 1 acre	20	51	68	79	84
Residential 2 acres	Residential districts by average lot size: 2 acre	12	46	65	77	82
Water/ Wetlands		0	0	0	0	0

4.2.2 Χρόνος μεταφοράς δικτύου

Η αξιολόγηση του χρόνου μεταφοράς του δικτύου ροής είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του ιστογράμματος χρόνου-εμβαδού της λεκάνης απορροής. Ο υπολογισμός απαιτεί την εύρεση της απόστασης μεταφοράς σε κάθε κελί (Flow Length grid). Η μέγιστη τιμή του Flow Length grid ανήκει στο πιο απομακρυσμένο κελί της λεκάνης από την έξοδο. Ο χρόνος μεταφοράς δικτύου ή αλλιώς Travel time Grid (TtGrid) είναι ανάλογος με τις τιμές του Flow Length grid και δίνεται από την σχέση:

$$TtGrid = \frac{T_c}{Max\ of\ Cell\ travel\ lengths} * FlowLengthgrid \quad (4.9),$$

όπου ο παρανομαστής Max of Cell travel lengths είναι η μέγιστη τιμή του Flow Length grid. Η μέγιστη τιμή του Flow Length είναι ήδη υπολογισμένη από το Κεφάλαιο 4.2.1. του τεύχους και ισούται με 60.358 m. Η τιμή του χρόνου συγκέντρωσης είναι $T_c=10$ hours σύμφωνα με τις σχέσεις (3) και (1) του προηγούμενου κεφαλαίου. Με την εντολή του ArcGis raster calculator υπολογίστηκε το ζητούμενο μέγεθος TtGrid. Το TtGrid χωρίστηκε σε 16 κλάσεις (Σχήμα 4.21.) και έπειτα δημιουργήθηκε το raster του αρχείου αυτού για την εξαγωγή των δεδομένων σε txt αρχείο.



Σχήμα 4.21. Διαχωρισμός TtGrid σε 16 κλάσεις [Πηγή: Ιδία επεξεργασία]

4.2.3. Συντελεστής αποθήκευσης-εξασθένησης (R)

Ο συντελεστής αποθήκευσης-εξασθένησης (R) αντανακλά αποτελέσματα αποθήκευσης των ρευμάτων και συνήθως λαμβάνεται γραφικά από κάποιο παρατηρημένο Υδρογράφημα της λεκάνης απορροής. Σε λεκάνες στις οποίες δεν έχει γίνει κάποια μέτρηση (ungauged) ο συντελεστής αποθήκευσης-μεταφοράς δεν μπορεί να υπολογιστεί από κάποιο παρατηρημένο

Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

Υδρογράφημα. Στις περιπτώσεις αυτές ο συντελεστής επιλέγεται, παράγοντας Στιγμιαία Μοναδιαία Υδρογραφήματα για διάφορα χρονικά βήματα πχ. 10 λεπτών, 30 λεπτών, μίας ώρας.

Στην υπό μελέτη εργασία η λεκάνη απορροής δεν είναι ungauged, επομένως μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από κάποιο παρατηρημένο Υδρογράφημα.

4.2.4. Ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας

Το ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας απεικονίζει την επιφάνεια της λεκάνης απορροής δίνοντας την ροή στην έξοδο για κάθε δοσμένο χρόνο μετά από μία βροχόπτωση. Το ιστόγραμμα είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό αφού παράγει το Μοναδιαίο Υδρογράφημα της λεκάνης απορροής. Από το Μοναδιαίο Υδρογράφημα μπορεί να εξαχθεί μετά η μορφή και τα χαρακτηριστικά αποξήρανσης της λεκάνης. Το ιστόγραμμα μπορεί να παραχθεί από διαφορετικά χρονικά βήματα μέσω του TtGrid που έχει υπολογιστεί νωρίτερα. Αυτό γίνεται για να βρεθεί το κατάλληλο ιστόγραμμα και κατ' επέκταση Μοναδιαίο Υδρογράφημα της λεκάνης απορροής.

Έχοντας υπολογίσει όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται για την μεθοδολογία του Clark's, η απορροή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος. Το ποσοστό του συνολικού όγκου που συνεισφέρει στην απορροή της λεκάνης για κάθε χρονικό βήμα υπολογίζεται από το ιστόγραμμα χρόνου-επιφάνειας. Οι υπολογισμένοι όγκοι μετατρέπονται σε απορροή για κάθε χρονικό βήμα και υπολογίζεται το Στιγμιαίο Μοναδιαίο Υδρογράφημα για το εξεταζόμενο δίκτυο ροής.

4.3. Υπολογισμός πλημμυρογραφημάτων

Αφού υπολογίστηκε το Μοναδιαίο Υδρογράφημα από το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας μπορεί να βρεθεί το καθαρό προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα της λεκάνης. Αυτό θα υπολογιστεί συνθετικά και αθροιστικά αφού η βροχή δεν πέφτει όλη την πρώτη ώρα αλλά μοιράζεται στο χρόνο. Η καθαρή βροχή του κάθε επεισοδίου πολλαπλασιάζεται για δεδομένη ώρα με το ΜΥΓ της λεκάνης απορροής και διαιρείται με τα 10 mm βροχής για να μετατραπεί σε απορροή. Τα 10 mm βροχής είναι αυτά που έχουμε θεωρήσει από θεωρία ότι πέφτουν για την δημιουργία του ΜΥΓ. Μετατοπίζοντας κάθε φορά στο EXCEL προς τα κάτω μία ώρα (την κάθε στήλη) την απορροή και αθροίζοντας όλες τις απορροές προκύπτει το καθαρό προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα της λεκάνης απορροής. Εφαρμόστηκε η μέθοδος της αναλογίας για κάθε

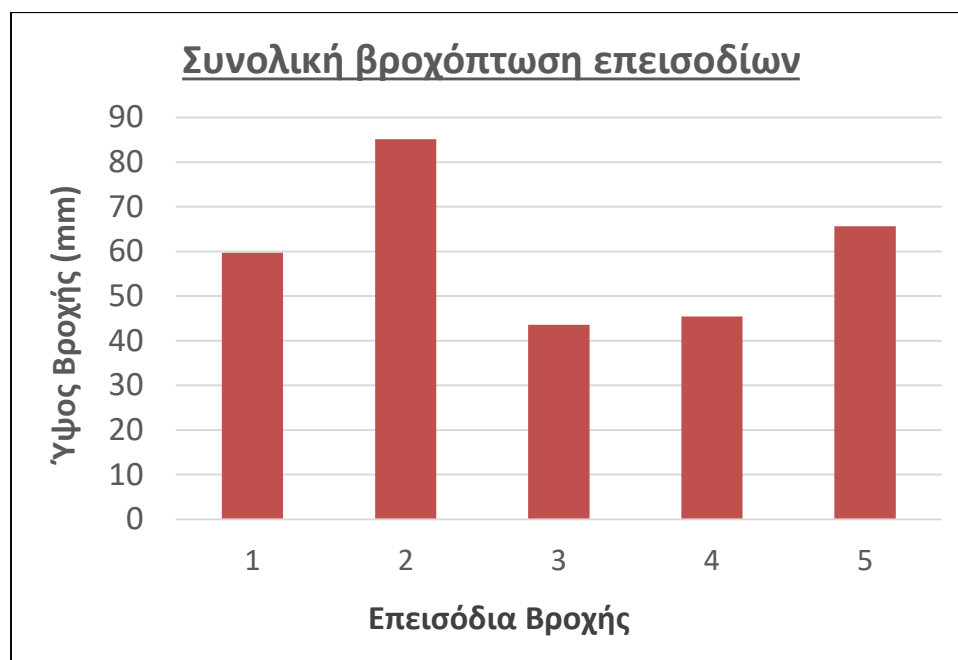
Κεφάλαιο 4. Μεθοδολογία

επιμέρους βροχόπτωση διάρκειας 1 hr. Παρατηρούμε ότι κάθε επιμέρους επεισόδιο βροχόπτωσης είναι μετατοπισμένο χρονικά από το προηγούμενο κατά 1 hr. Τέλος, με οριζόνια άθροιση όπως αναφέρθηκε προκύπτει το καθαρό πλημμυρογράφημα.

Κεφάλαιο 5. Βαθμονόμηση - Επαλήθευση μοντέλου

Για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της βαθμονόμησης – επαλήθευσης (Calibration – Verification) του υδρολογικού μοντέλου της λεκάνης απορροής, έγιναν χρήση συνολικά 5 επεισοδίων βροχόπτωσης. Τα 3 χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση και τα άλλα 2 για την επαλήθευση.

Το διάστημα στο οποίο αναζητήθηκαν και επιλέχθηκαν τα επεισόδια είναι μεταξύ των ετών 2011 – 2015. Και τα 5 επεισόδια είναι μεταξύ Δεκεμβρίου – Μαρτίου λόγω των μεγάλων βροχοπτώσεων των μηνών αυτών. Κατά τη διαδικασία επιλογής, αποκλείστηκαν επεισόδια μη συνεχόμενα, που περιλάμβαναν κλάδους βροχής με σημαντική χρονική παύση μεταξύ τους. Τα συνολικά ύψη βροχής των επεισοδίων, ανηγμένα επιφανειακά μέσω της μεθόδου Thiessen παρουσιάζονται στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 5.1.). Επισημαίνεται πως τα επεισόδια κατατάσσονται, για λόγους ευκολίας, με χρήση αύξοντα αριθμού ανάλογα με τη χρονική σειρά που έλαβαν χώρα.



Σχήμα 5.1. Συνολικά ύψη βροχής χρησιμοποιηθέντων επεισοδίων

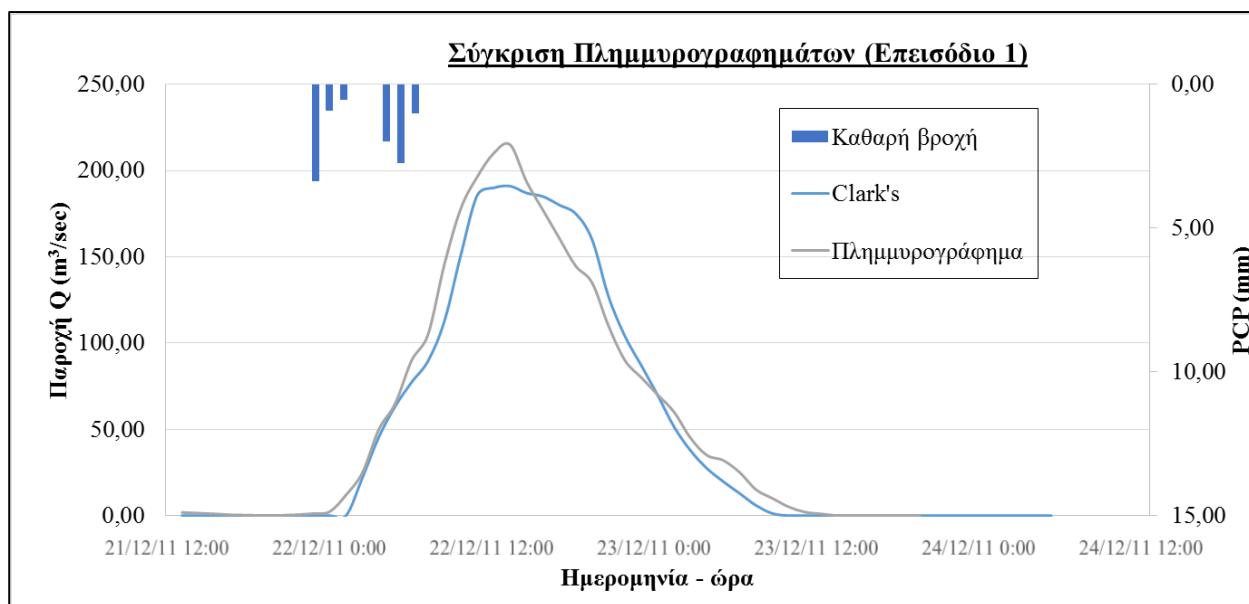
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα 5 αυτά επεισόδια, ακολουθεί βαθμονόμηση (calibration) και στην συνέχεια η επαλήθευση (verification).

5.1. Αρχικές εκτιμήσεις

Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιείται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν κατά το αρχικό στάδιο της προεκτίμησης για τα υπό μελέτη 5 επεισόδια. Στα παρακάτω Σχήματα παρουσιάζεται η σύγκριση του καθαρού παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος με αυτό που προέκυψε από την μέθοδο του Clark. Σε όλα τα διαγράμματα φαίνεται και η καθαρή (ενεργός) βροχόπτωση, η οποία προέκυψε αφαιρώντας τις απώλειες από την συνολική. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι αρχικές που προέκυψαν από τους πίνακες του CN ($CN = 80,63$, $T_c = 10,82$ hours). Η αναλυτική διαδικασία υπολογισμού του CN αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.2 του τεύχους. Όπως θα παρατηρήσουμε και στα παρακάτω αποτελέσματα υπάρχουν αρκετές αποκλίσεις του προσομοιωμένου με το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα.

5.1.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

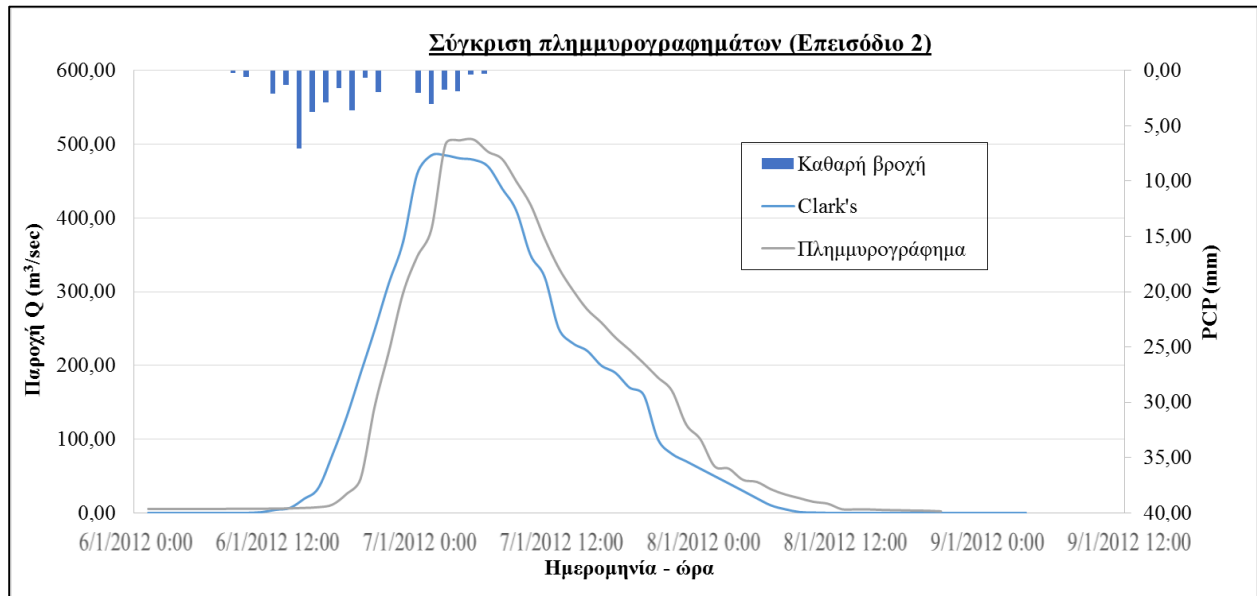
Επεισόδιο 1 : (21/12/2011-24/12/2011)



Σχήμα 5.2. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων επεισοδίου 1

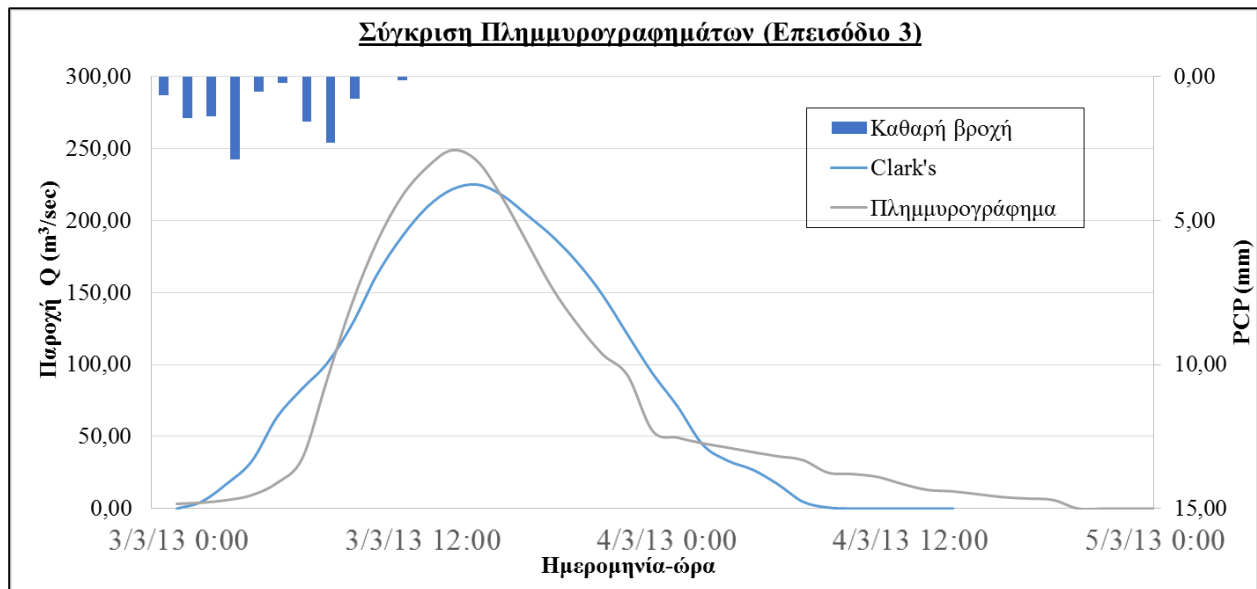
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – μελλοντική έρευνα

Επεισόδιο 2 : (06/01/2012 - 09/01/2012)



Σχήμα 5.3. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων επεισοδίου 2

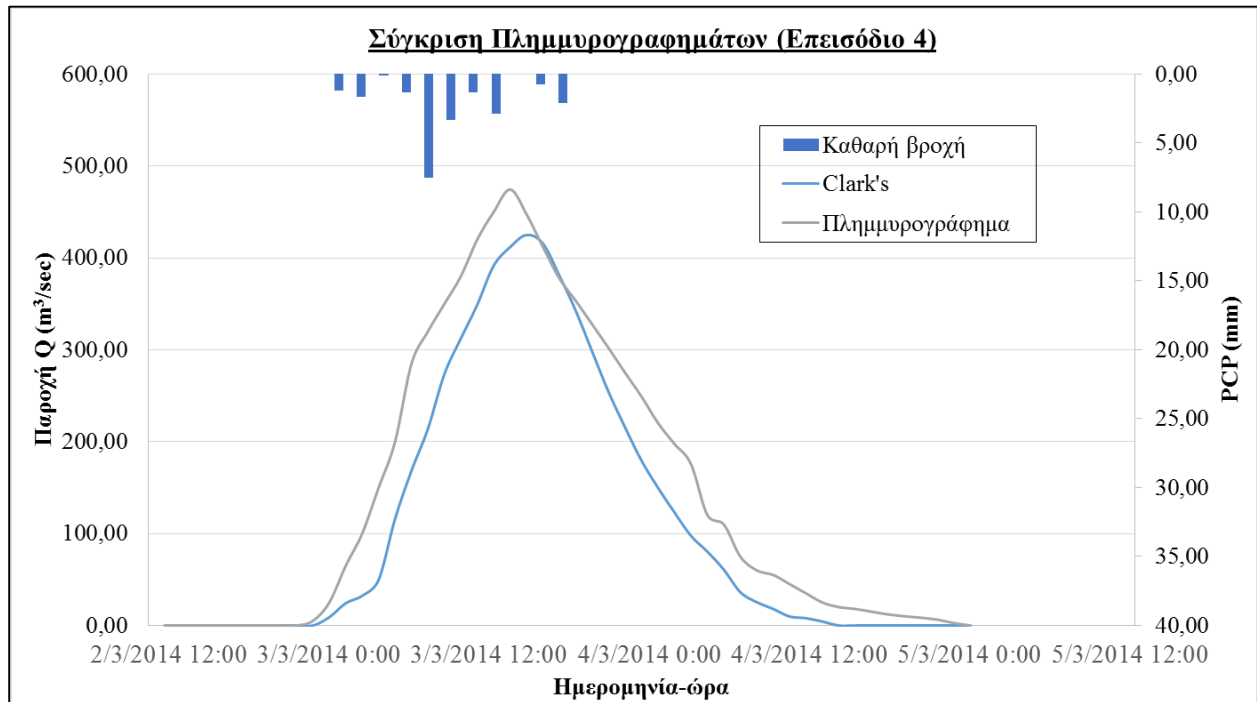
Επεισόδιο 3 : (03/03/2013 – 07/03/2013)



Σχήμα 5.4. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων επεισοδίου 3

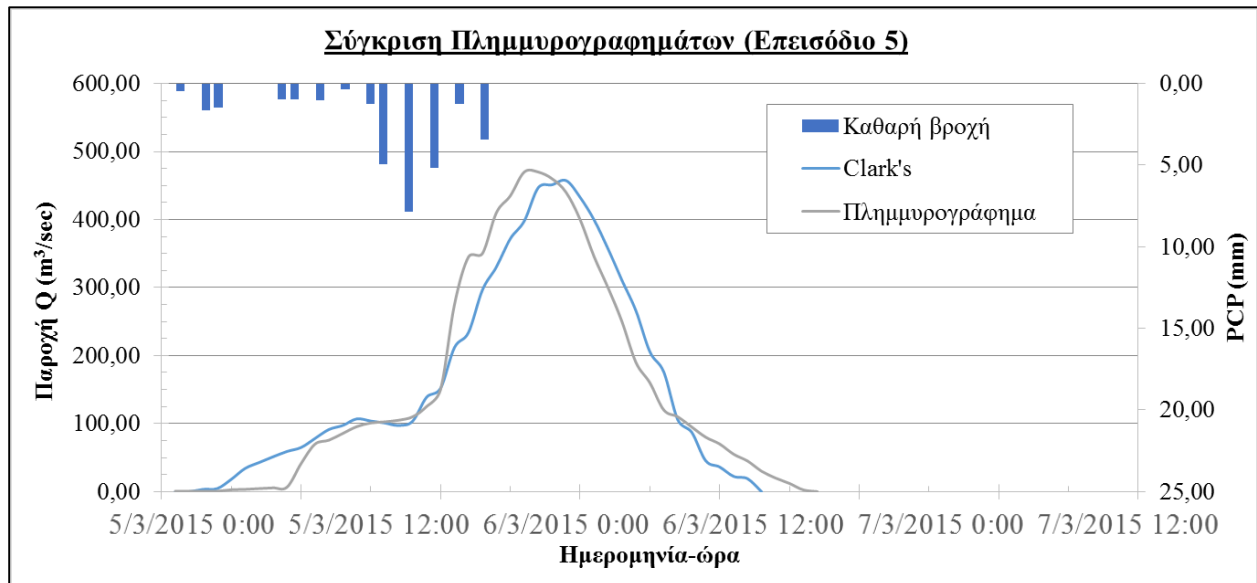
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – μελλοντική έρευνα

Επεισόδιο 4 : (02/03/2014 – 04/03/2014)



Σχήμα 5.5. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων επεισοδίου 4

Επεισόδιο 5 : (05/03/2015 – 08/03/2015)



Σχήμα 5.6. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων επεισοδίου 5

5.2. Βαθμονόμηση μοντέλου

5.2.1 Γενικά περί βαθμονόμησης

Ο όρος βαθμονόμηση προέρχεται από τις στατιστικές επιστήμες και υποδηλώνει μια συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές (Μαμάσης, 2009).

Για τον έλεγχο της προσαρμογής αυτής και την ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων που παρατηρούνται μεταξύ παρατηρημένων και προσομοιωμένων πλημμυρογραφημάτων, στην παρούσα εργασία υιοθετήθηκε η χρήση τεσσάρων κριτηρίων αποτελεσματικότητας της βαθμονόμησης. Με τον τρόπο αυτό, τα κύρια μεγέθη τα οποία ενδιαφέρουν καθίστανται άμεσα και με αντικειμενικό τρόπο συγκρίσιμα, ενώ παράλληλα παρέχεται η δυνατότητα για πιο ασφαλή και στοχευμένα συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων.

Τα κριτήρια είναι τα εξής:

Δείκτης Nash – Sutcliffe (Efficiency Index – Ef)-

Ο δείκτης αυτός ελέγχει τη συνολική προσαρμογή της καμπύλης προσομοίωσης σε αυτή της παρατηρημένης, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορές αυτών στα διάφορα σημεία, καθ' όλο το μήκος τους. Ορίζεται ως:

$$Ef = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.1)$$

όπου:

x_i = η παρατηρημένη χρονοσειρά απορροής

\bar{x} = η μέση τιμή της

y_i = η προσομοιωμένη χρονοσειρά απορροής στην υπό εξέταση χρονικό ορίζοντα ελέγχου

Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1. Αν $Ef = 1$ υπάρχει απόλυτη ταύτιση της παρατηρημένης με την προσομοιωμένη χρονοσειρά. Εφόσον $Ef < 0$ η προσαρμογή

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – μελλοντική έρευνα

του μοντέλου θεωρείται πολύ κακή, καθώς η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι χειρότερη εκτιμήτρια σε σχέση με τη μέση παρατηρημένη x (Μαμάσης, 2009).

Δείκτης PEV (percent error in volume)

Ορίζεται ως το επί τοις εκατό σφάλμα του συνολικού όγκου.

$$PEV = 100 \left| \frac{V_o - V_m}{V_o} \right| \quad (5.2)$$

όπου:

V_o και V_m είναι οι συνολικοί όγκοι του παρατηρημένου και προσομοιωμένου πλημμυρογραφήματος αντίστοιχα.

Δείκτης PEPF (percent error in peak flow)

Ορίζεται ως το επί τοις εκατό σφάλμα της παροχής αιχμής, χωρίς να περιλαμβάνει κάποια χρονική συσχέτιση μεταξύ παρατηρημένης και προσομοιωμένης αιχμής.

$$PEPF = 100 \left| \frac{Q_{o(peak)} - Q_{m(peak)}}{Q_{o(peak)}} \right| \quad (5.3)$$

όπου:

$Q_o(peak)$ και $Q_m(peak)$ είναι οι παροχές αιχμής του παρατηρημένου και του προσομοιωμένου πλημμυρογραφήματος αντίστοιχα.

Διαφορά ΔT_{pf}

Ορίζεται ως η απόλυτη χρονική διαφορά εκφρασμένη σε λεπτά (min), μεταξύ της παρατηρημένης και προσομοιωμένης παροχής αιχμής.

5.2.2 Διαδικασία βαθμονόμησης

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι κατά βάση αυτή της εμπειρικής βαθμονόμησης. Η μέθοδος αυτή δεν αποτελεί μία αυστηρή συστηματική διαδικασία και βασίζεται στην διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων, που επιλέγει σύμφωνα με την εμπειρία του ο χρήστης (Μαμάσης, 2009). Η υιοθέτησή της βασίστηκε στην αξιοποίηση της συγκεντρωμένης εμπειρίας από παρελθούσες έρευνες και μελέτες που έχουν εκπονηθεί στη συγκεκριμένη περιοχή.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – μελλοντική έρευνα

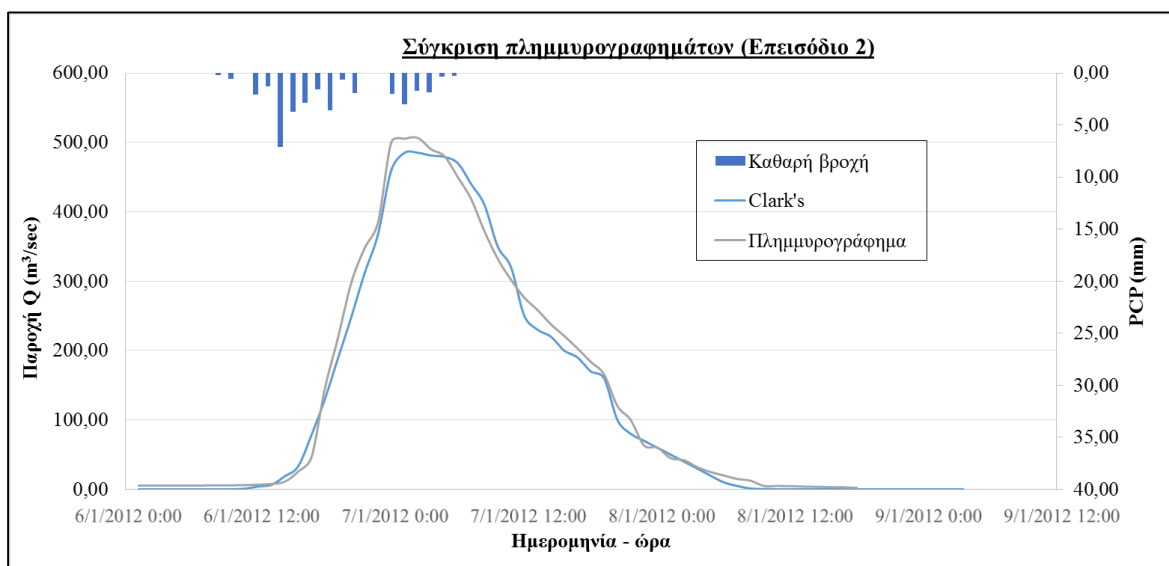
Για κάθε επεισόδιο ξεχωριστά πραγματοποιήθηκε ρύθμιση όλων των παραμέτρων, με σκοπό το εξαγόμενο πλημμυρογράφημα να προσεγγίζει με τη μικρότερη δυνατή απόκλιση το παρατηρημένο. Στην παρούσα μελέτη η παράμετρος που θα διαδραματίσει κυρίαρχο ρόλο στην διαδικασία της βαθμονόμησης είναι ο Curve Number (CN). Γνωρίζοντας την τιμή του μπορεί να εξαχθεί το ΜΥΓ της λεκάνης και από εκεί το πλημμυρογράφημα του Clark's.

Η προσαρμογή των πλημμυρογραφημάτων αξιολογούνταν για κάθε διαφορετική εκτέλεση του μοντέλου με βάση τον παραπάνω δείκτη και αναλόγως την τιμή του συνεχιζόταν ή σταματούσε η διαδικασία ρύθμισης. Ως καθοριστικός εξ αυτών, κρίθηκε ο δείκτης Nash – Sutcliffe (E_f), μιας και είναι ο μόνος που λαμβάνει υπόψη τη συνολική, ανά σημείο των καμπυλών συσχέτιση. Προκύπτουσες τιμές αυτού μεγαλύτερες ή ίσες του 0,7, θεωρούνταν κατά τη προσομοίωση αρκετά ικανοποιητικές. Δεύτερο κατά σειρά καθοριστικό κριτήριο επιτυχίας της ρύθμισης αποτέλεσε η ταύτιση των αιχμών, τόσο ποσοτική όσο και χρονική, η οποία συνάδει με την ελαχιστοποίηση του δείκτη PEPF και της διαφοράς ΔT_{pf} . Τέλος, στη σύγκλιση των όγκων δόθηκε το μικρότερο, συγκριτικά με τα υπόλοιπα βάρους, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως δεν επιδιώχθηκε η κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτών (μέσω της ελαχιστοποίησης του δείκτη PEV).

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για καθένα από τα τρία επεισόδια βροχής, τα οποία αναλύονται στο τέλος της παραγράφου.

5.2.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων βαθμονόμησης

Επεισόδιο 2 : (06/01/2012 - 09/01/2012)

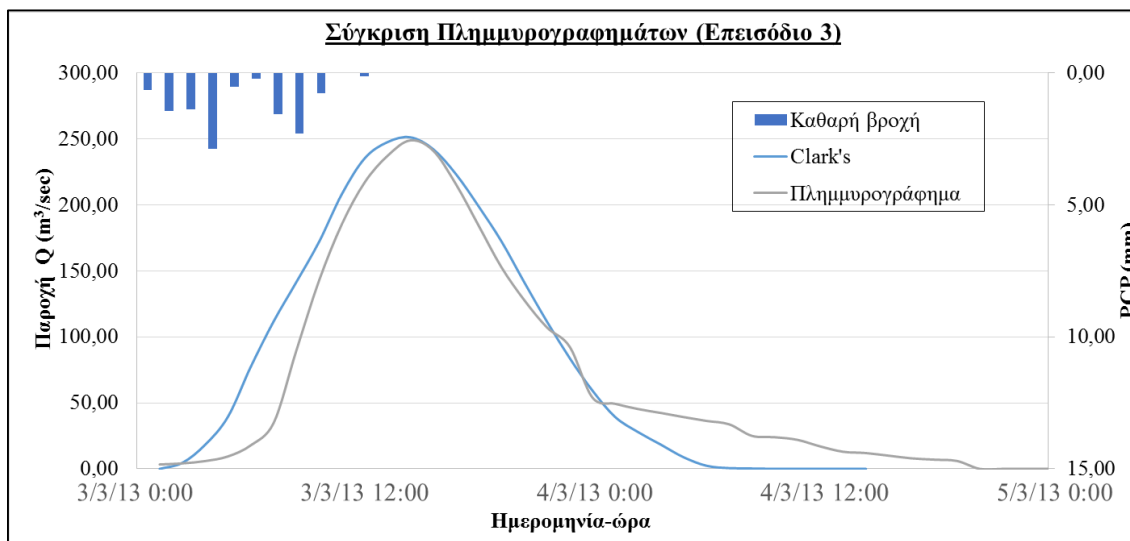


Σχήμα 5.7. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων Επεισοδίου 2 μετά απο βαθμονόμηση

Πίνακας 5.1. Κριτήρια αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης Επεισοδίου 2

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Clark	0,98	5,4	3,9	30

Επεισόδιο 3 : (03/03/2013 – 07/03/2013)

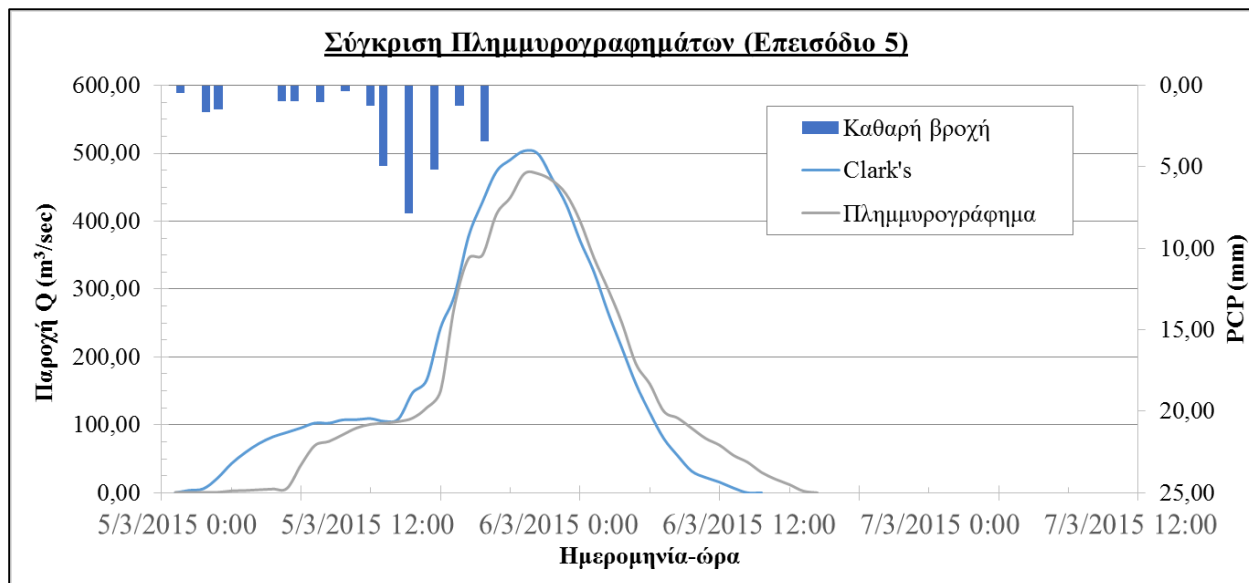


Σχήμα 5.8. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων Επεισοδίου 3 μετά από βαθμονόμηση

Πίνακας 5.2. Κριτήρια αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης Επεισοδίου 3

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Clark	0,90	2,7	0,9	40

Επεισόδιο 5 : (05/03/2015 – 08/03/2015)



Σχήμα 5.9. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων Επεισοδίου 5 μετά από βαθμονόμηση

Πίνακας 5.3. Κριτήρια αποτελεσματικότητας βαθμονόμησης Επεισοδίου 5

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Clark	0,92	5,1	7,1	30

Πίνακας 5.4. Αποτελέσματα βαθμονόμησης και μέσες τιμές

	CN	T_c (hours)
Επεισόδιο 2	80	10,82
Επεισόδιο 3	87	8,55
Επεισόδιο 5	90	7,75
Μέσος όρος	86	9,04

5.2.4. Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης

Κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης, επετεύχθη σε ικανοποιητικό βαθμό η προσαρμογή των προσομοιωμένων καμπύλων στις παρατηρημένες και για τα 3 επεισόδια που επιλέχθηκαν.

Συγκεκριμένα, ο δείκτης Nash – Sutcliffe (E_f) είναι σε όλες τις περιπτώσεις μεγαλύτερος του 0,7 (τιμή που θεωρείται ως οριακά ικανοποιητική) με χαμηλότερη τιμή αυτή του Επεισοδίου 3 που είναι 0,90. Η προσομοίωση των αιχμών (PEPF) και του χρόνου κρίνεται αρκετά ικανοποιητική στο Επεισόδιο 2 και κυρίως στο 3 κάτι βέβαιο που δεν συμβαίνει με την αιχμή στο Επεισόδιο 5 που παρουσιάζει σφάλμα της τάξης του 7,1 %. Η επί τοις εκατό διαφοροποίηση των όγκων (PEV) έχει εύρος τιμών από 2 – 6 % τιμές που θεωρούνται ικανοποιητικές για το μοντέλο.

Στον Πίνακα 5.4. παρουσιάστηκαν οι αριθμοί Curve και οι χρόνοι συγκέντρωσης (T_c) που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των πλημμυρογραφημάτων. Αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή του CN και κατ' επέκταση του χρόνου συγκέντρωσης μεταβάλλεται και το ΜΥΓ της λεκάνης. Στόχος είναι να προκύψει ένα ΜΥΓ το οποίο να προσομοιώνει καλύτερα το μοντέλο και την φύση.

Συνολικά, λοιπόν, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η διαδικασία της βαθμονόμησης ήταν επιτυχής. Η συνολική πάντως αξιολόγηση, προκύπτει από την επαλήθευση του μοντέλου, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

5.3. Επαλήθευση μοντέλου

Ως επαλήθευση ορίζεται η διαδικασία αξιολόγησης των μαθηματικών υδρολογικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του φυσικού συστήματος που προσομοιώνουν. Συνήθως, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από τη βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της λεκάνης. Για να έχει νόημα μια τέτοια προσέγγιση θα πρέπει τα χαρακτηριστικά του συστήματος να έχουν διατηρηθεί αμετάβλητα για το σύνολο της περιόδου ελέγχου του μοντέλου (περίοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί). Διαφορετικά

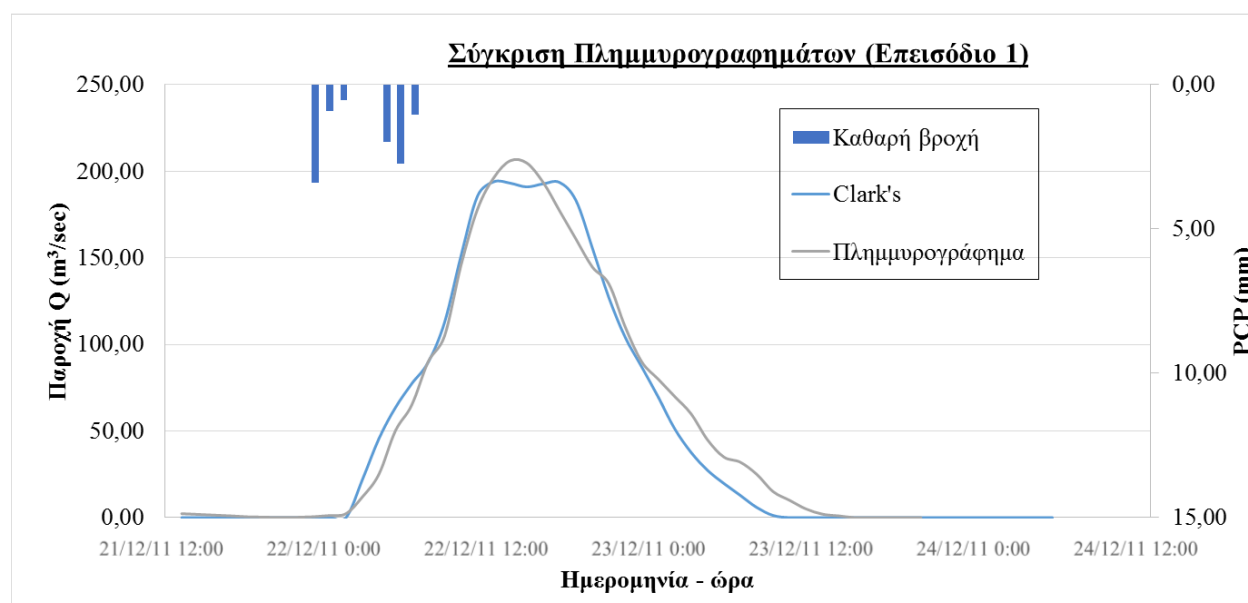
οι παράμετροι θα πρέπει να θεωρηθούν διαχρονικά μεταβαλλόμενες, περιορίζοντας δραστικά την επιχειρησιακή χρησιμότητα του υδρολογικού μοντέλου (Μαμάσης, 2012).

Για την τετραετία στην οποία ανήκουν τα προσομοιωμένα επεισόδια, θεωρήθηκε πως τα χαρακτηριστικά του συστήματος παραμένουν σχετικά αμετάβλητα. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στο γεγονός, αφενός μεν της μικρής χρονικά περιόδου προσομοίωσης, αφετέρου δε της μη ύπαρξης κάποιου καταλυτικού γεγονότος στο διάστημα αυτό (μεγάλη πλημμύρα κτλ) το οποίο θα μετέβαλε ριζικά τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Παρόλα αυτά, δεν παραγνωρίζεται η επίδραση της κίνησης των φερτών στο ρέμα η οποία σίγουρα σε κάποιο βαθμό έχει οδηγήσει σε μεταβολές αναφορικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτού.

Κατά την διαδικασία της επαλήθευσης, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου η μέση τιμή του αριθμού CN, όπως αυτή υπολογίστηκε κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης (Πίνακας 5.4.). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια κριτήρια ελέγχου της αποτελεσματικότητας δηλαδή οι δείκτες E_f , PEPF, PEV και ΔT_{PF} .

5.3.1. Παρουσίαση αποτελεσμάτων επαλήθευσης

Επεισόδιο 1 : (21/12/2011-24/12/2011)

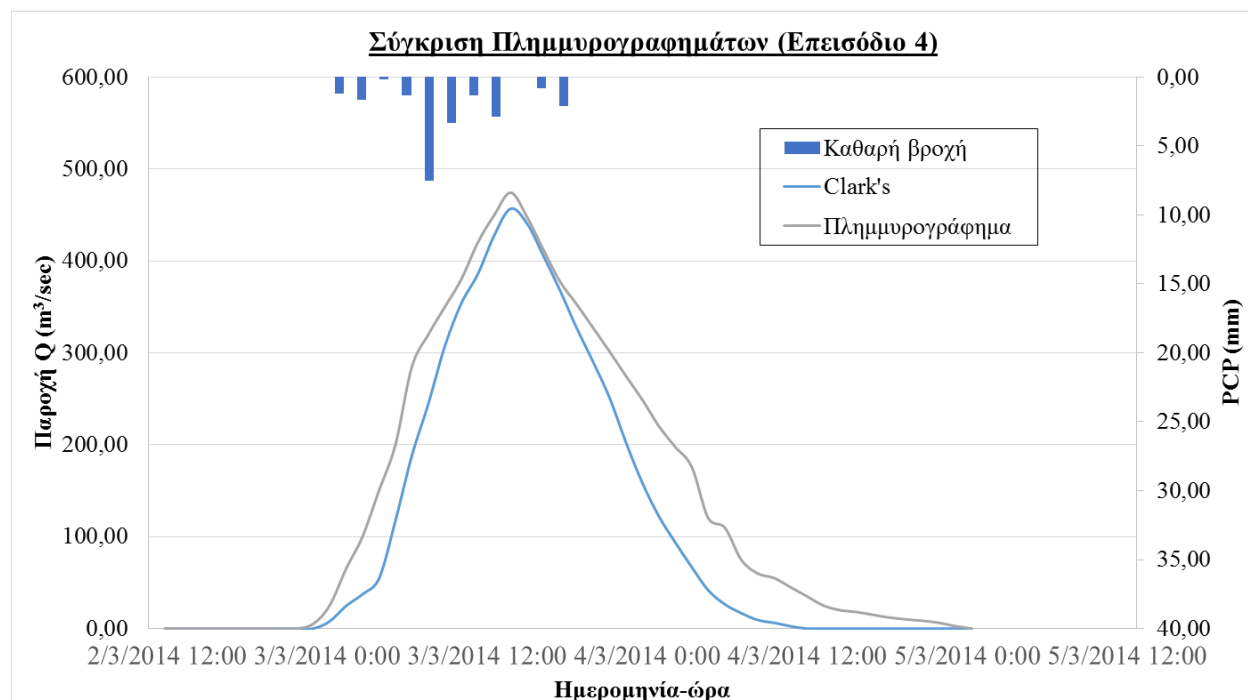


Σχήμα 5.10. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων Επεισοδίου 1 μετά από επαλήθευση

Πίνακας 5.5. Κριτήρια αποτελεσματικότητας επαλήθευσης Επεισοδίου 1

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Clark	0,97	3,2	5,8	60

Επεισόδιο 4 : (02/03/2014 – 04/03/2014)



Σχήμα 5.11. Σύγκριση πλημμυρογραφημάτων Επεισοδίου 4 μετά από επαλήθευση

Πίνακας 5.6. Κριτήρια αποτελεσματικότητας επαλήθευσης Επεισοδίου 4

Μέθοδος απορροής	E_f	PEV (%)	PEPF (%)	ΔT_{PF} (min)
Clark	0,9	24,3	3,6	20

5.3.2. Σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων της επαλήθευσης

Τα αποτελέσματα της επαλήθευσης κρίνονται ικανοποιητικά στα 2 Επεισόδια. Ο δείκτης Nash – Sutchliffe (E_f) είναι και στις δύο περιπτώσεις μεγαλύτερος του 0,70 φτάνοντας έως 0,97 στο

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – μελλοντική έρευνα

Επεισόδιο 1, αριθμός που θεωρείται σχεδόν άριστος. Η προσομοίωση των αιχμών (PEPF) και του χρόνου κυμαίνεται σε λογικά πλαίσια φτάνοντας έως απόλυτη χρονική διαφορά τα 60 min. Αυτό είναι λογικό γιατί οι βροχές και οι παροχές στην παρούσα μελέτη έχουν υπολογιστεί ανά ώρα, με αποτέλεσμα να μην είναι πολύ αξιόπιστες οι τιμές του χρόνου μέσα στο διάστημα της ώρας. Η σχετικά μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται κατά την προσομείωση των πλημμυρικών όγκων του επεισοδίου 4 αλλά με δεδομένη την καλή συσχέτιση (δείκτης E_F) και των καλών τιμών αιχμής (PEPF), αξιολογείται ως δευτερεύουσας σημασίας.

Συνολικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι το μοντέλο είναι σε θέση να προσομοιώσει σε ικανοποιητικό βαθμό τις υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην λεκάνη απορροής. Μειονέκτημα, ωστόσο αποτελεί η τιμή της απόκλισης του πλημμυρικού όγκου του Επεισοδίου 4, αλλά δεν αποτελεί κύριο κριτήριο αξιοπιστίας στην παρούσα μελέτη, διότι ασχολείται περισσότερο με την πλημμυρική αιχμή και η συνολική προσαρμογή των καμπύλων.

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα - μελλοντική έρευνα

6.1. Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η εφαρμογή του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος του Clark στον άνω ρου του Αλφειού ποταμού. Η περιοχή μελέτης προσανατολίζεται στην δυτική Πελοπόννησο και αποτελεί τμήμα της λεκάνης απορροής του Αλφειού, με έκταση 870 km². Είναι μία περιοχή με πλούσιο υδρογραφικό δίκτυο λόγω των έντονων βροχοπτώσεων κυρίως τους χειμερινούς μήνες. Αποτέλεσμα των βροχοπτώσεων είναι η δημιουργία πλημμυρών που πλήττουν τις χρήσεις γης και τις ανθρώπινες ιδιοκτησίες.

Αρχικά επιλέχθηκαν 5 ακραία επεισόδια βροχοπτώσεων (χωρίς χιόνι) μεταξύ των ετών 2011 – 2015 για τα οποία έγινε η προσαρμογή του μοντέλου. Χρησιμοποιήθηκαν δύο σταθμοί μέτρησης βροχής, της Πιάνας και των Αραχαμίτων. Έγινε η εξαγωγή των 5 παρατηρημένων πλημμυρογραφήματων χρησιμοποιώντας την καμπύλη στάθμης – παροχής, τα πολύγωνα Thiessen για τη βροχόπτωση, τον δείκτη φ και την γραμμική μέθοδο διαχωρισμού βασικής – άμεσης απορροής.

Στην συνέχεια εφαρμόστηκε η μεθοδολογία του Clark σε περιβάλλον GIS. Υπολογίστηκε ο χρόνος συγκέντρωσης και στην συνέχεια ο χρόνος μεταφοράς δικτύου της ροής στην λεκάνη απορροής. Για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης χρειάστηκε να βρεθεί η παράμετρος του CN. Για την παράμετρο αυτή πραγματοποιήθηκε συνθετική εκτίμηση, από Πίνακες, Χάρτες εδαφικών ενώσεων και χρήσεων γης. Αμέσως μετά δημιουργήθηκε το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας και το MYG της λεκάνης. Από το MYG εξάχθηκε το καθαρό πλημμυρογράφημα. Εξαιτίας της απόκλισης του παρατηρημένου πλημμυρογραφήματος με το προσομοιωμένο που προέκυψε από το GIS κρίθηκε αναγκαία η βαθμονόμηση και η επαλήθευση του μοντέλου. Η παράμετρος που χρησιμοποιήθηκε για την προσαρμογή ήταν αυτή του CN.

Από τα 5 επεισόδια τα 3 χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση και τα άλλα 2 για επαλήθευση. Δίνοντας διάφορες τιμές στο CN, έγινε η προσπάθεια προσέγγισης των δύο πλημμυρογραφήματων. Ο μέσος όρος του CN που προέκυψε για τα 3 επεισόδια της βαθμονόμησης ήταν αυτός που χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση του μοντέλου. Τέλος,

έγινε η επαλήθευση του μοντέλου για τα άλλα 2 επεισόδια και εξετάστηκε αν το μοντέλο του Clark είναι τελικά κατάλληλο για την υπολεκάνη του Αλφειού.

6.2. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις αρχικές εκτιμήσεις παρατηρήθηκε ότι η εκτίμηση του CN από του Πίνακες και τα Σχήματα υπολογισμού του δεν έδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα στην προσομοίωση. Υπάρχουν δηλαδή αποκλίσεις τόσο σε θέματα πλημμυρικής αιχμής, όσο και πλημμυρικού όγκου στα καθαρά πλημμυρογραφήματα. Αυτό συνέβη λόγω της αδυναμίας των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών να απεικονίσουν επακριβώς την πραγματικότητα.

Κατά τη βαθμονόμηση διαπιστώθηκε ότι το υδρολογικό μοντέλο του Clark είναι αρκετά αξιόπιστο οδηγώντας σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κατά την διαδικασία της βαθμονόμησης δεν υπήρξε κάποιο επεισόδιο που να είχε μεγάλες αποκλίσεις τιμών από την πραγματικότητα. Κατά την επαλήθευση διαπιστώθηκε πως το μοντέλο προσομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό τις υδρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην λεκάνη απορροής. Η μεγαλύτερη επιτυχία παρουσιάζεται στις πλημμυρικές αιχμές και στον δείκτη Nash – Sutcliffe. Το κομμάτι που παρατηρήθηκε ότι έχει σφάλμα είναι αυτό της εκτίμησης των όγκων του Επεισοδίου 4, αλλά είναι δευτερεύουσας σημασίας ο δείκτης στην παρούσα εργασία.

6.3. Μελλοντική έρευνα

Το μοντέλο του Clark αποδείχθηκε πολύ καλό στην προσομοίωση της λεκάνης απορροής της Καρύταινας, έχοντας μικρές αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Μελλοντικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν πιο πολλά επεισόδια για την μελέτη, δίνοντας ακόμα πιο ξεκάθαρα αποτελέσματα και ακρίβεια στις εκτιμήσεις. Ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερες παράμετροι για την βαθμονόμηση και την επαλήθευση, διότι στην παρούσα εργασία ήταν μόνο η τιμή του CN. Επίσης, θα μπορούσε να γίνει αντίστοιχη εφαρμογή και σε λεκάνες που δεν έχουν μετρήσεις, διότι το μοντέλο του Clark μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε τέτοιες λεκάνες λόγω του μικρού αριθμού δεδομένων που απαιτεί. Τα δεδομένα των βροχοπτώσεων θα μπορούσαν να ληφθούν και περισσότερους σταθμούς μέτρησης στην κοντινή περιοχή για μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία των δεδομένων εισόδου. Η μέθοδος του Clark θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε όλη την λεκάνη απορροής του Αλφειού για συνολική εποπτεία των

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα – μελλοντική έρευνα

αποτελεσμάτων στην περιοχή. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί άλλο μοντέλο βροχής – απορροής για έλεγχο των αποτελεσμάτων και έτσι θα γινόταν και η σύγκριση ανάμεσα σε αυτά τα μοντέλα για την ανάδειξη του πιο κατάλληλου. Από τα πολυάριθμα διαθέσιμα μοντέλα βροχής – απορροής, η ουσία είναι να βρεθεί η χρυσή τομή ανάμεσα σε εκείνο που προσομοιάζει καλύτερα την υπό εξέταση λεκάνη απορροής και στο λιγότερο περίπλοκο από άποψη υπολογισμών και απαιτήσεων σε δεδομένα.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ελληνική βιβλιογραφία

Ευστρατιάδης, Α., Μαμάσης, Ν., *Πρόγραμμα εκπαίδευσης συστημάτων Υδροσκοπίου*, Κεντρική Υπηρεσία Υδάτων, 2010.

Καββαδά, Ο., *Ανάλυση μεθόδων βροχής - απορροής σε υδρολογικά μοντέλα με χρήση ΣΓΠ*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Περιβάλλον και Ανάπτυξη, 2012.

Λεοντόπουλος, Ε., *Επεξεργασία δεδομένων στάθμης και παροχής με χρήση του EXCEL*, Διπλωματική εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, 1997.

Μαμάσης, Ν., *Διαφάνειες μαθήματος Προχωρημένη Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2009

Μαμάσης, Ν., *Διαφάνειες μαθήματος Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2010.

Μαμάσης, Ν., *Σημειώσεις μαθήματος Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα*, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Αθήνα 2011.

Μιμίκου, Μ.Α., *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*, 3^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2006.

Μιμίκου, Μ.Α., Μπαλτάς, Ε.Α., *Τεχνική Υδρολογία*, 5^η έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2012.

Μπαριάμης, Γ.Ε., *Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και εφαρμογή στην λεκάνη του ρέματος Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Αθήνα 2013.

Αναφορές

Παπαζαφειρίου, Ζ., *Υδρολογία Επιφανειακών Υδάτων*, ΕΜΠ, Αθήνα, 1983.

Χαλκιάς, Χ., *Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (GIS)*, 2006.

Χριστοφίδης, Α., *Ανάπτυξη μοντέλου βροχής-απορροής σε σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS)*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 2008.

Ξένη βιβλιογραφία

Anastasiadis, S., Boglis, A., Pechlivanidis, I., Lekkas, D., Baltas, E., *Application of GIS based Clark's unit hydrograph and transfer function model to describe runoff response in a small catchment, Case Study: Lykoremma river, Greece*, Fresenius Environmental Bulletin., Vol. 22., No. 7B., 2013.

Boyer, M. C.M, *Streamflow measurement*, Handbook of Applied Hydrology, ch 15. Ven Te Chow (ed), McGraw-Hill, 1964.

Burrough, P. A., and R. A. McDonnell. *Principles of geographical information systems Oxford University Press New York*, 1998.

Clark, C. O., *Storage and the unit hydrograph*, Trans. Am. Soc. Civ. Engr., 110, 1945-1946.

Costache, Romulus, *Using GIS techniques for assessing lag time and concentration time in small river basins. Case study: Pecineaga river basin, Romania*. Geographia Technica 9. : 31- 38., 2014.

De Smedt, F., Y. B. Liu, and S. Gebremeskel. *Hydrologic modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information*. Risk Analysis II : 295-304., 2000.

Αναφορές

Diakakis, Michalis, Spyridon Mavroulis, and Giorgos Deligiannakis. *Floods in Greece, a statistical and spatial approach*. Natural hazards 62. 2 : 485-500., 2012,

Duan, Qingyun, Soroosh Sorooshian, and Vijai Gupta. *Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models*. Water resources research 28.4: 1015-1031, 1992.

Fairfield, John, and Pierre Leymarie. *Drainage networks from grid digital elevation models*. Water resources research 27.5: 709-717, 1991.

Hudson, Paul F., and Rene R. Colditz. *Flood delineation in a large and complex alluvial valley, lower Panuco basin, Mexico*. Journal of Hydrology 280.1 (2003): 229-245, 2003.

Jonkman, Sebastiaan N. *Global perspectives on loss of human life caused by floods*. Natural hazards 34.2: 151-175, 2005.

Maguire, David J. *An overview and definition of GIS*. Geographical information systems: Principles and applications 1: 9-20, 1991.

Montgomery, David R., and Efi Foufoula-Georgiou. *Channel network source representation using digital elevation models*. Water Resources Research 29.12: 3925-3934, 1993.

Nash, J., The forms of instantaneous unit hydrograph, Int. Ass. Sci. and Hydrology, Pub. 1, 45(3), 114-121., 1957.

Narayan, Kailash, P. K. S. Dikshit, and S. B. Dwivedi. *GIS supported geomorphologic instantaneous unit hydrograph (GIUH) of Varuna river basin using geomorphological characteristics*. Int J Adv Earth Sci 1.2: 68-76, 2012.

Αναφορές

Noorbakhsh, M. E., M. B. Rahnema, and S. Montazeri. *Estimation of instantaneous unit hydrograph with Clark's method using GIS techniques*. Journal of Applied Sciences (Pakistan) 5.3: 455-458, 2005.

Schiariti, P.E., CPESC. , *Basic Hydrology Runoff Curve Numbers*, Mercer County Soil Conservation District, 2008.

Shaw, E. M., *Hydrology in Practice, Third Edition*, Chapman & Hall, 1994.

Pechlivanidis, I. G., et al. Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications, Global NEST journal 13.3: 193-214, 2011.

Rodríguez-Iturbe, Ignacio, and Juan B. Valdes, The geomorphologic structure of hydrologic response, Water resources research 15.6: 1409-1420, 1979.

Sherman, LeRoy K, Streamflow from rainfall by the unit-graph method, Eng. News Record 108: 501-505., 1932.

Διαδικτυακοί ιστότοποι

www.eur-lex.europa.eu

www.moa.gov.cy

www.ypeka.gr

www.civilprotection.gr

www.arcadia.ceid.upatras.gr

www.in.gov

Αναφορές

www.engineering.purdue.edu

www.northmeteo.gr

www.topodigos.gr

www.ndbhmi.chi.ntua.gr

www.epfl.ch

www.auth.gr