



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ**  
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**  
**ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**«ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ**  
**ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΛΕΚΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΗΣ**  
**ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ»**

**Ιωάννης Αποστολόπουλος**

**Επιβλέπων: Ε. Μπαλτάς, Καθηγητής**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ**  
**ΚΑΙ**  
**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**  
**ΥΔΑΤΙΚΩΝ**  
**ΠΟΡΩΝ»**

**Αθήνα, Οκτώβριος 2016**



## Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b>	<b>vii</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>ix</b>
<b>Executive Summary</b>	<b>xi</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος .....	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	2
<b>2 Δεδομένα - Περιοχή μελέτης</b>	<b>3</b>
2.1 Δεδομένα .....	3
2.1.1 Γενικά.....	3
2.2 Περιοχή μελέτης.....	4
2.2.1 Γενικά.....	4
2.2.2 Λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη.....	4
2.2.3 Λεκάνη απορροής Πορταϊκού.....	5
2.2.4 Λεκάνη απορροής Βενέτικου.....	6
2.3 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά λεκανών απορροής .....	7
2.3.1 Γενικά.....	7
2.3.2 Εδαφολογικοί χάρτες λεκανών απορροής περιοχών μελέτης .....	8
2.4 Επικρατούσες χρήσεις γης λεκανών απορροής .....	10
2.4.1 Γενικά.....	10
2.4.2 Χάρτες χρήσεων γης .....	11
<b>3 Μεθοδολογία</b>	<b>17</b>
3.1 Μοναδιαία υδρογραφήματα .....	17
3.2 Υπολογισμός ΜΥΓ από παρατηρημένα υδρογραφήματα .....	18
3.3 Συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα .....	19
3.3.1 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Snyder.....	19
3.3.2 Αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS.....	21
3.3.3 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Sierra Nevada .....	24

3.3.4	Μέθοδος ισόχρονων καμπυλών .....	27
3.3.5	Μέθοδος IUH κατά Clark .....	28
3.3.6	Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου υδρολογίας.....	29
3.4	Εκτίμηση αριθμού καμπύλης CN.....	30
3.5	Δείκτες αξιολόγησης αποτελεσμάτων .....	34
<b>4</b>	<b>Επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους</b>	<b>37</b>
4.1	Εισαγωγή.....	37
4.2	Λογισμικό Arc Hydro Toolbox .....	37
4.2.1	Γενικά.....	37
4.2.2	Προεπεξεργασία ΨΜΕ.....	37
4.2.3	Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου.....	38
4.2.4	Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής .....	39
4.4	Περιγραφή μεθόδου ΣΜΥΓ κατά Clark σε περιβάλλον GIS .....	43
4.4.1	Γενικά.....	43
4.4.2	Υπολογισμός αριθμού καμπύλης CN.....	43
4.4.3	Υπολογισμός χρόνου συγκέντρωσης .....	44
4.4.4	Κάναβος χρόνου απορροής.....	44
4.5	Περιγραφή μεθόδου ισόχρονων καμπυλών σε λογισμικό GIS.....	45
4.5.1	Γενικά.....	45
4.5.2	Υπολογισμός ταχύτητας ροή υδρογραφικού δικτύου .....	45
4.5.3	Υπολογισμός κανάβου ταχύτητας χερσαίας ροής.....	46
4.5.4	Υπολογισμός Ισόχρονων καμπυλών .....	46
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>49</b>
5.1	Εισαγωγή.....	49
5.2	Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη.....	49
5.2.1	Μέθοδος Snyder.....	49
5.2.2	Μέθοδος SCS .....	50
5.2.3	Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.....	51
5.2.4	Μέθοδος Ισόχρονων καμπυλών .....	52
5.2.5	Μέθοδος IUH Clark .....	53
5.2.6	Μέθοδος Sierra Nevada .....	55
5.2.7	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα .....	56

5.3	Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Πορταϊκού.....	57
5.3.1	Μέθοδος Snyder.....	57
5.3.2	Μέθοδος SCS.....	58
5.3.3	Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.....	59
5.3.4	Μέθοδος Ισόχρονων καμπυλών.....	60
5.3.5	Μέθοδος IUH Clark.....	61
5.3.6	Μέθοδος Sierra Nevada.....	63
5.3.7	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	64
5.4	Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Βενέτικου.....	65
5.4.1	Μέθοδος Snyder.....	65
5.4.2	Μέθοδος SCS.....	66
5.4.3	Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας.....	67
5.4.4	Μέθοδος Ισόχρονων καμπυλών.....	68
5.4.5	Μέθοδος IUH Clark.....	69
5.4.6	Μέθοδος Sierra Nevada.....	71
5.4.7	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	72
5.5	Δείκτες αξιολόγησης αποτελεσμάτων λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη.....	73
5.6	Δείκτες αξιολόγησης αποτελεσμάτων λεκάνης απορροής Πορταϊκού.....	74
5.7	Δείκτες αξιολόγησης αποτελεσμάτων λεκάνης απορροής Βενέτικου.....	74
5.8	Σύγκριση ειδικής παροχής.....	75
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>76</b>
6.1	Σύνοψη.....	76
6.2	Συμπεράσματα.....	77
6.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	80
	<b>Αναφορές</b>	<b>82</b>
	Στην ελληνική γλώσσα.....	82
	Ξενόγλωσσες.....	82



# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Μπαλά ,Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, επιβλέποντα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας για την ανάθεση του τόσο ενδιαφέροντος θέματος, την σημαντική βοήθεια, την καθοδήγηση και την κατανόηση του.

Ευχαριστώ επίσης την υποψήφια Διδάκτορα Ελισάβετ Φελώνη για την βοήθεια της, την άμεση ανταπόκριση και υπομονή της, όσες φορές χρειάστηκε να την συμβουλευτώ.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους εργαζόμενους στο Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ) για την παροχή ψηφιακού χαρτογραφικού υποβάθρου με γεωλογικούς χάρτες, που ήταν απαραίτητοι για την εκπόνηση της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου από το παρών μεταπτυχιακό πρόγραμμα για την στήριξη τους κατά την ενασχόληση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, ένα θερμό ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου, για την υποστήριξη τους σε κάθε μου απόφαση και την υπομονή τους. Η βοήθεια τους είναι πολύτιμη.

Αποστολόπουλος Γιάννης,  
Οκτώβριος, 2016





# Περίληψη

---

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εφαρμογή συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων και άλλων μεθόδων, που χρησιμοποιούνται ευρέως για εξαγωγή υδρολογικής πληροφορία σε λεκάνες που δεν υπάρχουν μετρήσεις, σε τρεις λεκάνες απορροής της κεντρικής Ελλάδας, η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με μοναδιαία υδρογραφήματα που έχουν προκύψει από ανάλυση μετρήσεων βροχής-απορροής και εν συνέχεια η αξιολόγηση τους με κριτήρια κατάλληλους δείκτες.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε τρεις λεκάνες απορροής διαφορετικού μεγέθους, Αλή Εφέντη έκτασης 2778 km<sup>2</sup>, Πορταϊκού έκτασης 134 km<sup>2</sup> και Βενέτικου 851 km<sup>2</sup>. Στις εξόδους των παραπάνω λεκανών υπάρχουν μετρήσεις παροχής καθώς και βροχομετρικά δεδομένα γεγονός που καθιστά εφικτό των προσδιορισμό μοναδιαίων υδρογραφημάτων για κάθε μια λεκάνη. Τα μοναδιαία υδρογραφήματα έχουν προκύψει από παλαιότερη μελέτη και ήταν απαραίτητα για να πραγματοποιηθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι το συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα των μεθόδων Snyder, SCS, Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, Sierra Nevada καθώς επίσης μοναδιαία υδρογραφήματα προέκυψαν με τις μεθόδους χρόνου-επιφανείας ή ισόχρονων καμπυλών όπως και του στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά Clark το οποίο δημιουργείται σε περιβάλλον λογισμικού γεωγραφικών συστημάτων συντεταγμένων. Τα αποτελέσματα των παραπάνω μεθόδων συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν σε σχέση με τα μοναδιαία υδρογραφήματα των λεκανών που έχουν προκύψει από την ανάλυση παρατηρήσεων βροχής απορροής με την χρήση κατάλληλων δεικτών όπως είναι ο δείκτης Nash-Sutcliffe, δείκτης PEV (percent error in volume), PEPF (percent error in peak flow και η διαφορά  $\Delta T_{PF}$ .

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν διαφέρουν για κάθε λεκάνη, ωστόσο δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ενθαρρυντικά για την χρήση των παραπάνω μεθόδων. Παρουσιάστηκαν μεγάλη διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων τόσο μεταξύ των μεθόδων, όσο και με τα υπολογισμένα μοναδιαία υδρογραφήματα. Η διερεύνηση των μεγάλων αποκλίσεων που παρατηρήθηκαν καθώς και η αναζήτηση τεχνικών που θα την περιορίζουν συγκεντρώνει μεγάλο ενδιαφέρον.



# Executive Summary

---

## **A. Introduction**

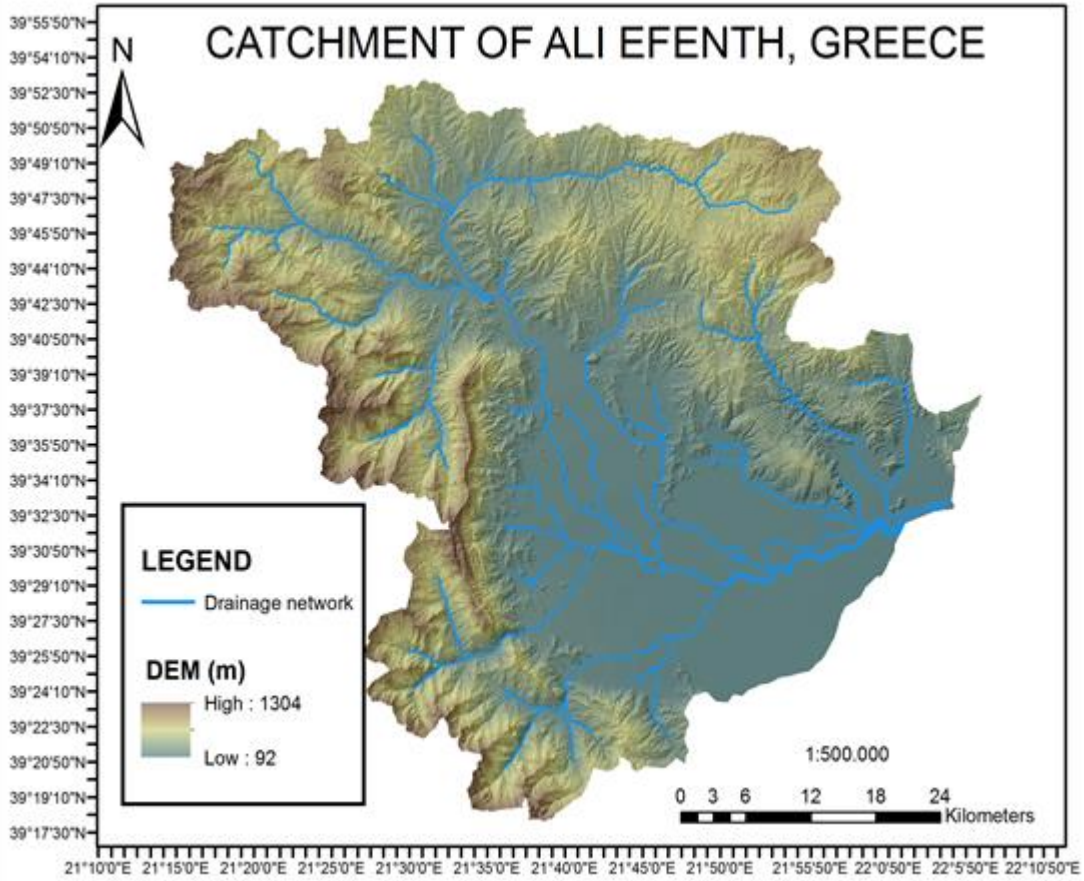
The Unit hydrograph (UH) concept was first proposed by Sherman (1932), on the basis of principle of superposition, and since then, UH has been used as an important technique for lumped rainfall - runoff data. Clark (1945) was the first to introduce the idea of Instantaneous Unit Hydrograph (CIUH) by combing 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 master’s thesis is the computation of synthetic unit hydrographs, GIS-based unit hydrographs which are commonly used for the extraction of hydrologic information in ungauged basins, at three catchments in central Greece, the comparison between the results and the calculated unit hydrographs (based on the analysis of rainfall-runoff data and finally, their evaluation according to four indices, being described afterwards.

## **B. Study Area and Data used**

The research was conducted for three catchments that differ both in size and shape; Ali Efenth, Portaikos and Ventetikos with base areas 2778 km<sup>2</sup>, 134 km<sup>2</sup> and 851 km<sup>2</sup> respectively (Fig 1, 2, 3). For anyone of the above mentioned catchments, there are available discharge and rainfall measurements which allow the specification of their unit hydrographs. These unit hydrographs have been calculated in a prior research (Baltas, personal communication) and were necessary for the evaluation of the present thesis’ results.

A 5×5 m<sup>2</sup> Digital Terrain Model (DTM or DEM) projected to the Greek coordinate system was used in order to identify the areas that contribute to the catchments. 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.



**Figure 1. Catchment of Ali Efenth**

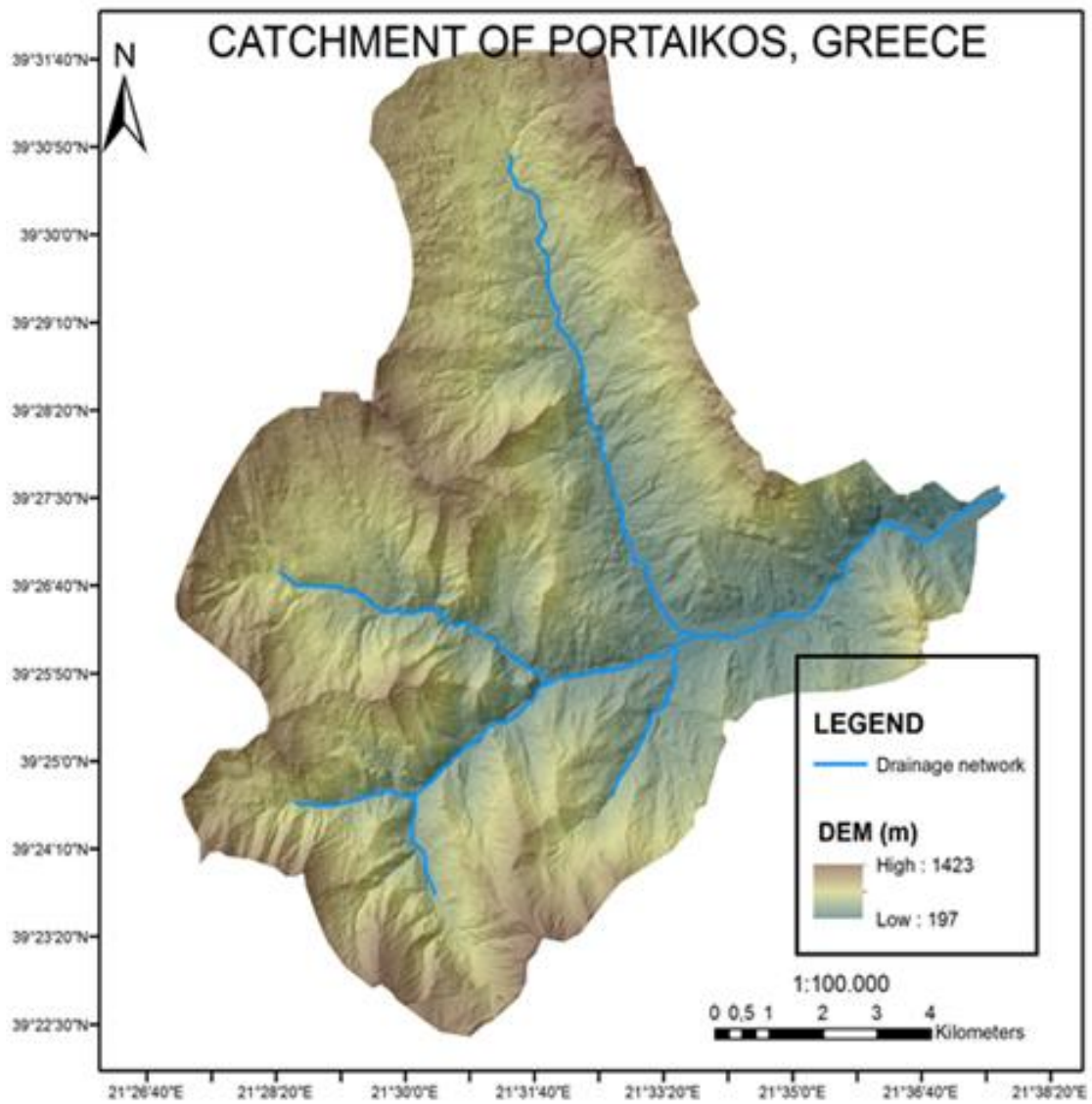


Figure 2. Catchment of Portaikos

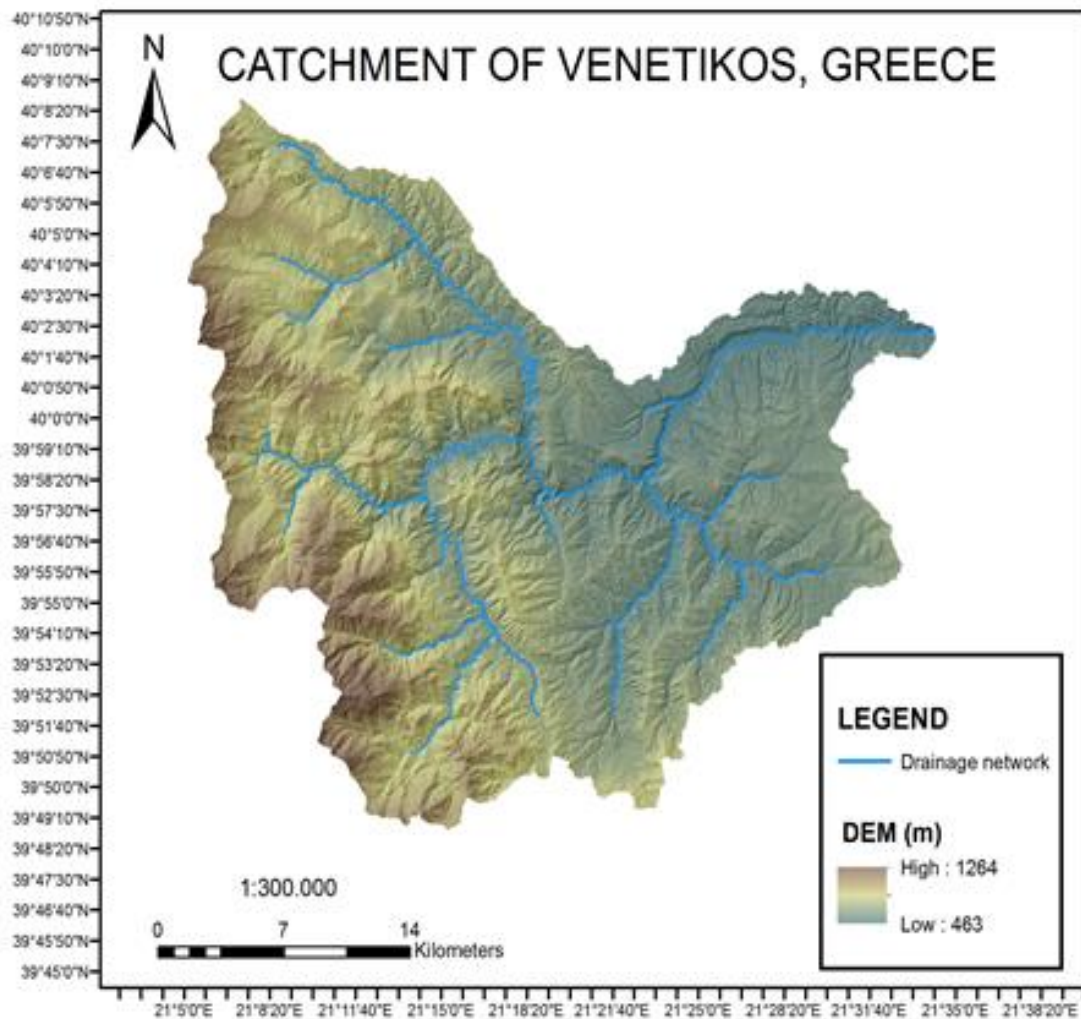


Figure 3. Catchment of Venetikos

### C. Methodology

A geomorphological analysis was held, with the aim of applying five synthetic unit hydrographs methods. The UH that were calculated are the following:

- Snyder unit hydrograph
- SCS dimensionless unit hydrograph
- Unit Hydrograph by British Institute of Hydrology
- Sierra's Nevada unit hydrograph
- Furthermore other GIS-based methods used were,
  - 'isochrones' and
  - instantaneous unit hydrograph by Clark

The basic points of each method are presented below:

#### 1. Snyder's synthetic unit hydrograph

Snyder developed the synthetic Unit Hydrograph theory in 1938 and it was modified later by more researchers. This method is applicable to the basins ranging in size from 30 to 30 000 km<sup>2</sup>. Snyder relation is as follows:

$$t_p = 0.75C_t(L_{CA}L)^{0.3} \quad (h) \quad (1)$$

where,

$t_p$ : basin lag time (h)

$C_t$ : coefficient for representation differences in types and locations of streams, generally ranging from 1.8 to 2.2.(although several other values outside this range are documented).Steeper slopes tend to have lower values.

$L$ :length of the main channel from the outlet to the watershed divide. (Note here that the length is up to the watershed divide and not where the stream begins)-(km).

$L_{CA}$ : length of the main channel from the outlet to the center of gravity of the basin. (km)

The peak discharge of the unit hydrograph is given as:

$$Q_p = C_p \frac{2.75A}{t_p} \quad (m^3 / s) \quad (2)$$

Where,

$A$ :drainage area (km<sup>2</sup>)

$C_p$ : storage coefficient from 0.4 to 0.8, can be obtained from standard texts (inversely related to  $C_t$ ).

The time base of the unit hydrograph is (days):

$$T = 3 + 3\left(\frac{t_p}{24}\right) \quad (days) \quad (3)$$

The duration of excess rainfall, is :

$$t_R = \frac{t_p}{5.5} \quad (h) \quad (4)$$

If the unit hydrograph is desired for duration other than above, the following relation for adjusting lag time is used:

$$t_{pR}' = t_p - \frac{tp/5.5 - t_R}{4} \quad (h) \quad (5)$$

The adjusted lag time is used in equation 2 for computing the correct peak flow,  $Q_p$

The other ordinates useful for shaping hydrograph are the widths at 50% and 75% of the peak flow values:

$$W_{50} = \frac{2.143}{Q_p^{1.09}} \quad (6)$$

$$W_{75} = \frac{1.225}{Q_p^{1.08}} \quad (7)$$

## 2. SCS's dimensionless synthetic unit hydrograph

In this method a dimensionless unit hydrograph is used. The of discharge defined as the ratio of the discharge from synthetic unit hydrograph to the discharge peak. The dimensionless time is defined as the ratio of the time of synthetic unit hydrograph to the peak time of synthetic. The steps in order to calculate the unit hydrograph are:

Time of peak:

$$t_p = \frac{t_R}{2} + t_L \quad (h) \quad (8)$$

Lag time:

$$t_L = 0.756C_i(LL_{CA})^{0.3} \quad (9)$$

Discharge peak:

$$Q_p = 2.08 \frac{Ah_s}{t_p} \quad (m^3 / s) \quad (10)$$

Where

$Q_p$ : discharge peak  $m^3/s$

A: area of catchment  $km^2$

$h_s$ : height of active rain (mm)

$t_p$ : time of discharge peak (h)

Once  $t_p$  and  $Q_p$  are determined, the unit hydrograph is being calculated using the table of dimensionless unit hydrograph.

## 3. British's Institute of Hydrology synthetic unit hydrograph



The British Institute of Hydrology method uses topographic and hydrologic basin characteristics as well as the slope of the maximum flow path.

Peak time of the unit hydrograph is calculated by:

$$t_p = \frac{46.6L^{0.14}}{S_{1085}^{0.38} (1+URBAN)^{1.99} RSMD^{0.4}} \quad (h) \quad (11)$$

Where:

L: max flow length (km)

$S_{1085}$ : characteristic slope of the main flow path

URBAN: percentage of the urban development in catchment (%)

RSMD: the maximum 24 h duration active rainfall d of 24 h for return time period of 5 years (mm)

The base time of hydrograph calculated by:

$$t_b = 2.52t_p \quad (h) \quad (12)$$

Discharge peak is calculated by:

$$Q_p = 2.2 \frac{A}{t_b} \quad (m^3 / s) \quad (13)$$

Where:

$h_0$ : active rain height 10 mm

A: catchment area (km<sup>2</sup>)

$t_b$ : peak time (h)

#### 4. Sierra's Nevada unit hydrographs

The Sierra Nevada method for the dimensionless unit hydrograph is extensively described in the "Design of small Dams" chapter 3 which is titled "Flood Hydrology studies".

Lag time is calculated from the equation:

$$t_L = 0.1776C \left[ \frac{LL_{CA}}{\sqrt{S}} \right]^N \quad (h) \quad (14)$$

Where:

$t_L$ : lag time of synthetic unit hydrograph (h)

C: constant equivalent to 26  $K_n$

$K_n$ : manning factor is equivalent to 0.12

L: max flow length (km)

$L_{CA}$ : length of main flow path from the exit point to the centroid of the basin (km)

S: slope of main flow path (m/m)

N: constant equivalent to 0.33

Based on the above the equation is formed as following:

$$t_L = 0.5541 \left[ \frac{LL_{CA}}{\sqrt{S}} \right]^{0.33} \quad (h) \quad (15)$$

The duration of the unit rain  $t_r$  is calculated by the following equation:

$$t_r = \frac{t_L}{5.5} \quad (h) \quad (16)$$

The steps to calculate the synthetic unit hydrograph are analyzed below:

$$t_m = \frac{T}{100} \left( t_L + \frac{t_r}{2} \right) \quad (17)$$

Where:

$t_m$ : time of synthetic unit hydrograph (h)

T: found in diagram of dimensionless unit hydrograph

$t_L$ : lag timed as calculated in equation 15

$t_r$ : as calculated by equation 16

The discharge value of unit hydrograph occurs from active rainfall and calculated by the equation:

$$Q_m = 0.1157 \times \left[ \frac{A \times q}{t_L + \frac{t_r}{2}} \right] \quad (m^3 / s) \quad (18)$$

Where:

$Q_m$ : discharge of synthetic unit hydrograph ( $m^3/s$ )

$t_L$ : lag timed as calculated in equation 15

$t_r$ : as calculated in equation 16

q: discharge of dimensionless unit hydrograph

## 5. Isochrones's method unit hydrograph

The method of the isochrones curves is a model that transforms the active precipitation to runoff, based on the time that is required for the water to reach the basin exit from each point of a catchment.

The hydrograph is the transformation of the histogram of the basin area at which the method of isochrones curves is applied. The histogram represents the relationship between the time of runoff and the area.

By utilizing GIS and with the increasing availability of DTMs, the analysis of the basin topography becomes easier and more precise. The purpose of the method is the determination of the geometric locus of the points that runoff the same exact time. The basin is represented as a canvas of pixels which have the same dimensions and whose altitude is known. In order

to implement the method of isochrones curves, the distance between each pixel and the basin exit must be initially calculated. Afterwards, via assumptions, especially in cases where data are not available, the velocity of water at each pixel is also calculated. With these two calculations, the calculation of the time runoff for each pixel is feasible.

The target distance can be easily determined through GIS. The speed that water has at each pixel depends on the following factors:

- Whether the pixel belongs in the hydrographic system
- The ground slope
- The land uses

The runoff velocity is separated in overland and river flow. Overland flow, depends on the ground slope and the land uses which are represented by a coefficient that simulates the roughness. Overland flow is given by:

$$V = K\sqrt{S} \quad (19)$$

The river flow due to the lack of hydrographic measurements is usually determined by assumptions. The next step is to combine the two speeds in order to produce the final speed for the whole are under study. The speed flow of each pixel, is used in combination with the distance of each pixel from the basin exit in order to calculate the time runoff. Then the transmutation of time area diagram to runoff volumes is feasible.

6. 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:

$$T_c = \frac{T_{lag}}{0.6} \quad (h) \quad (20)$$

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{190S^{0.5}} \quad (\text{min}) \quad (21)$$

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 for each basin.

The average CN value of the basin has been determined, according to the soil and vegetation data and the average basin slope is being obtained directly from the DTM. By inserting these values in SCS – equation (21), the resulting concentration time values.

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.

$$TtGrid = \frac{T_c}{MaxofCelltravellengths} FlowLenghtgrid \quad (22)$$

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).

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

➤ Nash – Sutcliffe model efficiency coefficient (Ef)

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (23)$$

where xi is observed discharge at time t, yi is modeled discharge, x is the mean of observed discharges.

➤ Index PEV (percent error in volume)

$$|PEV| = 100 \left| \frac{V_0 - V_M}{V_0} \right| \quad (24)$$

where Vo is observed volume, Vm is modeled volume.

➤ Index PEPF (percent error in peak flow)

$$PEPF = 100 \left| \frac{Q_{0(PEAK)} - Q_{M(PEAK)}}{Q_{0(PEAK)}} \right| \quad (25)$$

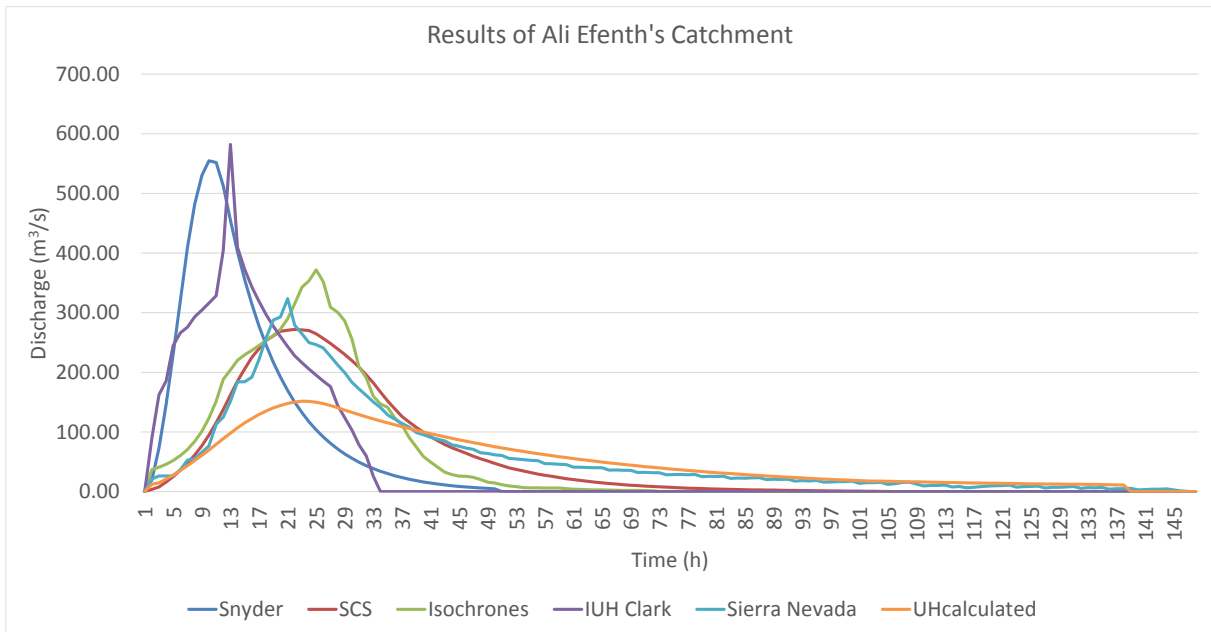
where Qo is the peak of observed discharge, Qm is the peak of modeled discharge.

➤ ΔTPF

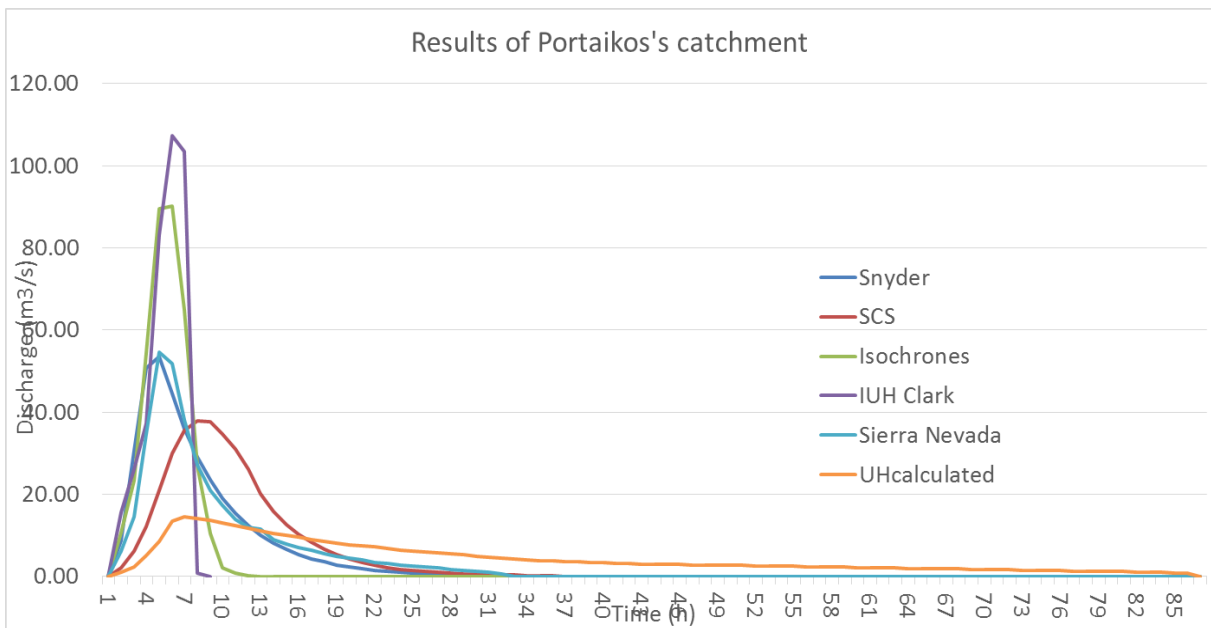
ΔTPF is the percent of peak time of observed discharged with the peak time of modeled discharged

## D. Results

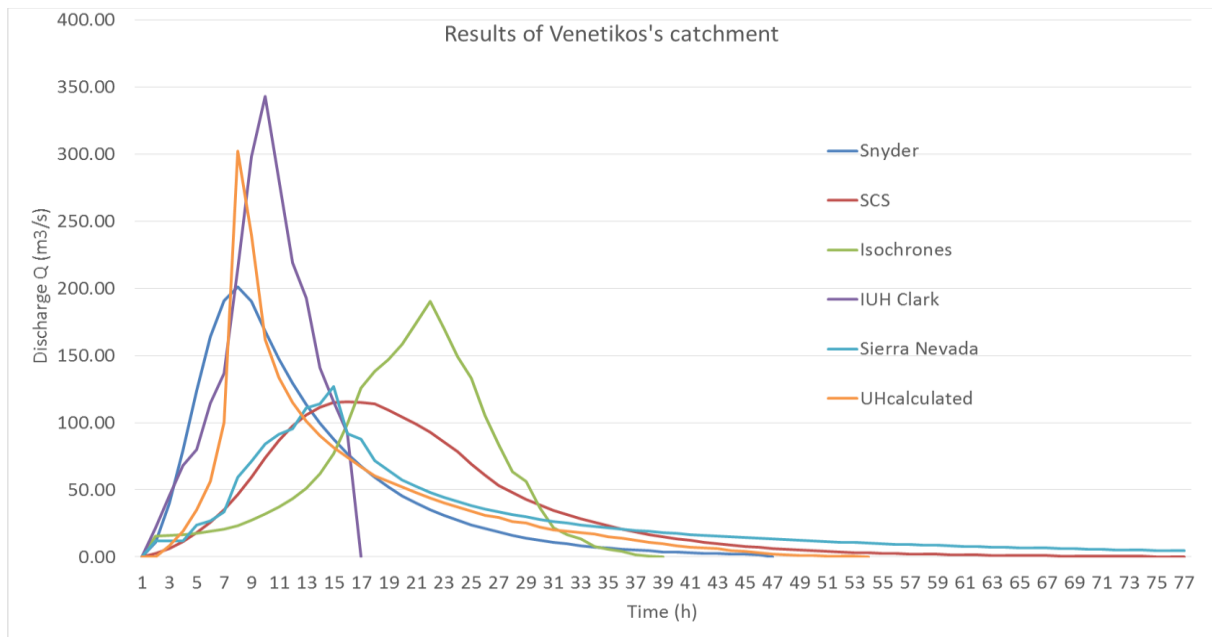
The results of the methods for each catchment, are shown in the figures below (Fig. 2-4).



**Figure 4. Results of Ali Efenth's catchment**



**Figure 5. Results of Portaikos's catchment**



**Figure 6. Results of Venetikos's catchment**

**Table 1: Values of indices for Ali Efenth's catchment**

Values of indices for Ali Efenth's catchment				
	Nash-Sutcliffe- $E_f$	PEV(%)	PEPF(%)	$\Delta T_{PF}$ (min)
Snyder	-21.26	2.81	265.99	780
SCS	-0.40	2.80	79.43	60
British In. Method	-1.00	95.04	65.18	5640
Isochrones	-3.01	2.62	145.35	120
Clark IUH	-1.71	2.81	284.02	600
Sierra Nevada	0.26	17.61	113.60	120

**Table 2: Values of indices for Portaikos's catchment**

Values for indices of Portaikos's catchment				
	Nash-Sutcliffe- $E_f$	PEV(%)	PEPF(%)	$\Delta T_{PF}$ (min)
Snyder	-16.57	0.01	265.75	180
SCS	-5.91	0.06	158.90	0
British In. Method	-0.73	0.38	53.44	2220
Isochrones	-53.65	0.08	517.69	120
Clark IUH	-81.62	0.08	635.55	120
Sierra Nevada	-11.44	0.07	273.26	180

**Table 3: Values of indices for Venetikos's catchment**

Values of indices for Venetikos's catchment				
	Nash-Sutcliffe- $E_f$	PEV(%)	PEPF(%)	$\Delta T_{PF}$ (min)
Snyder	0.72	4.03	33.41	0
SCS	0.23	4.00	61.75	480
British In. Method	-0.47	4.22	94.32	6120
Isochrones	-0.83	3.76	36.92	840
Clark IUH	-0.85	4.01	13.53	120
Sierra Nevada	0.94	4.03	58.06	420

**Table 4: Specific discharge values for methods used**

Catchment	$q_{max}$ ( $m^3/s/km^2$ )						
	Snyder	SCS	British In. Method	Isochrones	IUH Clark	MYT ( $\beta\rho-\alpha\pi$ )	Sierra Nevada
Ali Efenth	0.200	0.098	0.019	0.134	0.210	0.055	0.117
Venetikos	0.236	0.136	0.020	0.224	0.403	0.355	0.149
Portaikos	0.397	0.281	0.051	0.671	0.799	0.109	0.405

## E. Conclusions and Future Research

The methods used present tangible dissimilarities in their results for every type of catchment studied. Alarmingly, these results present the inability of the examined methods to simulate with precision the time series of the unit hydrograph calculated, which will be referred as  $UH_{calc}$ . A point of concern is the systematic overestimation of discharge peaks by the synthetic unit hydrograph.

Also, it appears to exist incompatibility in the base time of the  $UH_{calc}$ .

On the other hand, the values of runoff volumes are validated.

Specifically, the results of GIS-based unit hydrographs greatly overestimate the discharge peak and moreover display shorter base times.

Without ignoring the fact that every method above was deficient, the most appropriate for further use and any applications was the SCS's dimensionless unit hydrograph for catchments of Ali Efenth and Portaikos, while Snyder method is the most appropriate for Venetikos's catchment.

The spatial partition of each catchment to sub-basins, the synthetic unit hydrographs method application for these sub-basins and in continuation the routing (either using hydrologic or hydraulic method) of hydrographs to the position where there are available discharge data, would be highly interesting and prove whether this approach responds more accurate to the observed hydrographs.

Another suggestion would be the application of these methods to even more gauged basins over Greece, in order to correlate the occurred results with the topography, geomorphology, soil type and land use types of each basin. This could lead to the most appropriate method estimating the unit hydrographs in ungauged basins, with similar characteristics.

Additionally, it is suggested to compare the application of GIS-based unit hydrograph methods using digital elevation models with different spatial resolution, in order to detect the effects of the precision of the topographic primary data to the results.

A final proposition would be the evaluation of the appropriateness of the method applications, comparing them with the available rainfall-runoff datasets. By calculating the synthetic unit hydrographs, formed in combination with hyetographs, the estimated hydrographs will be compared directly to the observed runoff time series. In this way, we can eliminate the uncertainty of the calculated unit hydrographs.



# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Γενική τοποθέτηση του προβλήματος

Η διαχείριση των υδατικών πόρων, η μελέτη και ο σχεδιασμός υδραυλικών έργων όπως φράγματα γέφυρες οχετοί, δίκτυα ομβρίων, αντιπλημμυρικές τάφροι, απαιτούν μετρήσεις παροχής. Στην Ελλάδα, σημειώνεται έλλειψη μετρήσεων παροχής σε θέσεις υδρολογικού ενδιαφέροντος, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, αφενός μεν διότι η συντήρηση ενός τέτοιου δικτύου είναι δαπανηρή, αφετέρου λόγω της κατασκευής των μεγάλων φραγμάτων της χώρας τις προηγούμενες δεκαετίες και τη μείωση του ενδιαφέροντος για τα δεδομένα αυτά από την Δ.Ε.Η.

Για την αντιμετώπιση αυτής της αδυναμίας, χρησιμοποιούνται υδρολογικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά έχουν προκύψει από μετρήσεις παροχών, βροχόπτωσης και λαμβάνουν ως είσοδο τοπογραφικά και άλλα χαρακτηριστικά των οποίων η διαθεσιμότητα τους αυξάνεται τα τελευταία χρόνια. Η αξιοπιστία των μοντέλων αυτών αυξάνεται μέσω της βαθμονόμηση τους για τον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων τους.

Η χρησιμοποίηση των πλέον κατάλληλων μοντέλων μετατροπής της βροχόπτωσης σε απορροής και παραγωγή υδρογραφημάτων είναι από τα κυριότερα θέματα που καλείται να αντιμετωπίσει η κοινότητα της υδρολογίας. Ένα μείζον ζήτημα είναι η εφαρμογή των μοντέλων αυτών, τα οποία έχουν αναπτυχθεί για τύπους λεκανών άλλων χωρών, επομένως δεν λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες των λεκανών απορροής της Ελλάδας και ιδιαίτερα σε λεκάνες απορροής που δεν διαθέτουν δεδομένα βροχής – απορροής. Οι λεκάνες αυτές αποτελούν το συντριπτικό ποσοστό των λεκανών απορροής της χώρας.

Η αξιοποίηση των λεκανών απορροής που υπάρχουν δεδομένα υδρομετρήσεων είναι σημαντική. Μέσω της εφαρμογής μοντέλων μετατροπής βροχής σε απορροής, την σύγκριση με τα παρατηρημένα αποτελέσματα, την κατανόηση της επίδρασης των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται αλλά και την επίδραση των χαρακτηριστικών αυτών των λεκανών στο αποτέλεσμα μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την χρήση μεθόδων παραγωγής συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων σε λεκάνες απορροής με παρεμφερή χαρακτηριστικά.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση των αποτελεσμάτων έξι μεθόδων κατάρτισης συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων σε 3 λεκάνες απορροής, με διαφορετικά μορφομετρικά χαρακτηριστικά, με διαθέσιμες μετρήσεις παροχών και η εξαγωγή συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα που θα προκύψουν.

## **1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη και περιγράφει την δομή της εργασίας

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρει τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη και παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων για την εξαγωγή μορφομετρικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων υπολογισμού συνθετικών υδρογραφημάτων. Ακόμα υπολογίζονται οι δείκτες αποτελεσματικότητας για κάθε μέθοδο .

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

## 2 Δεδομένα - Περιοχή μελέτης

---

### 2.1 Δεδομένα

#### 2.1.1 Γενικά

Για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας απαιτούνταν ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης. Για την υλοποίηση αυτού του σταδίου της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα εξής δεδομένα:

- ΨΜΕ: Χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε διαστάσεων φατνίου 5x5 m. Η υψομετρική ακρίβεια του ΨΜΕ είναι  $RMSE_z \leq 2.00$  m για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Το γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς είναι το Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς, ΕΓΣΑ 87
- Υδρογραφικό δίκτυο: Η μορφή του υδρογραφικού δικτύου και τα χαρακτηριστικά του αποτελούσε μια κρίσιμη παράμετρο στην εργασία. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στον ακριβή προσδιορισμό του ο οποίος έγινε μέσω λογισμικού γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών. Ωστόσο, τα σφάλματα του ΨΜΕ αλλοιώνουν την πραγματική μορφή του. Ως μια αρχική εκτίμηση, αλλά και για επαλήθευση του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε το υδρογραφικό δίκτυο σε μορφή shapefile στο σύστημα αναφοράς ΕΓΣΑ 87 από τον ιστότοπο [geodata.gov.gr](http://geodata.gov.gr) το οποίο έχει επιμεληθεί το Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργεια και Κλιματικής Αλλαγής.
- Εδαφολογικοί χάρτες: Η σύσταση των εδαφών μιας λεκάνης απορροής επηρεάζει κυρίως τα υδρολογικά ελλείματα, δηλαδή τον διαχωρισμό της ενεργού από την ολική βροχόπτωση. Ειδικότερα, οι μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, όπως είναι η υδατοπερατότητα, η υδραυλική αγωγιμότητα επιδρούν άμεσα στο ρυθμό διήθησης και η χημική σύσταση καθορίζει την φυτοκάλυψη και κατ' επέκταση την κατακράτηση και διήθηση. Οι εδαφολογικοί χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν παραχωρήθηκαν από το Εθνικό Ίδρυμα Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ)
- Χρήσεις γης: Οι χρήσεις γης και ειδικότερα η φυτοκάλυψη επηρεάζουν την απορροή μέσω της παρεμπόδισης του όγκου απορροής κυρίως από την χλωρίδα, αλλά και την χρονική υστέρηση της απορροής λόγω της τραχύτητα των εδαφών. Για την υλοποίηση του GIO LAND χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες LANDSAT 7, SPOT και IRS της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας και γεωχωρικά δεδομένα της Ε.Κ.ΧΑ. Α.Ε. και συγκεκριμένα τα ενιαία χαρτογραφικά υπόβαθρα μεγάλης κλίμακας 1:5.000, δεδομένα Δασικών Χαρτών,

δεδομένα του έργου "Οριοθέτηση δασών και δασικών εκτάσεων" και ακτογραμμής, καθώς και δεδομένα από άλλες πηγές, όπως οικισμοί, υγρότοποι, οδικό δίκτυο και άλλα.

Οι χάρτες κάλυψης/χρήσης γης (corine landcover 2012) λήφθηκαν από τον ιστότοπο της Εθνικό Κτηματολόγιο και Χαρτογράφηση Α.Ε.

- ΜΥΓ: Για την σύγκριση των μοναδιαίων υδρογραφημάτων που προέκυψαν χρησιμοποιήθηκαν ΜΥΓ που προέκυψαν από ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής – απορροής (Μπαλτάς, προσωπική επικοινωνία).

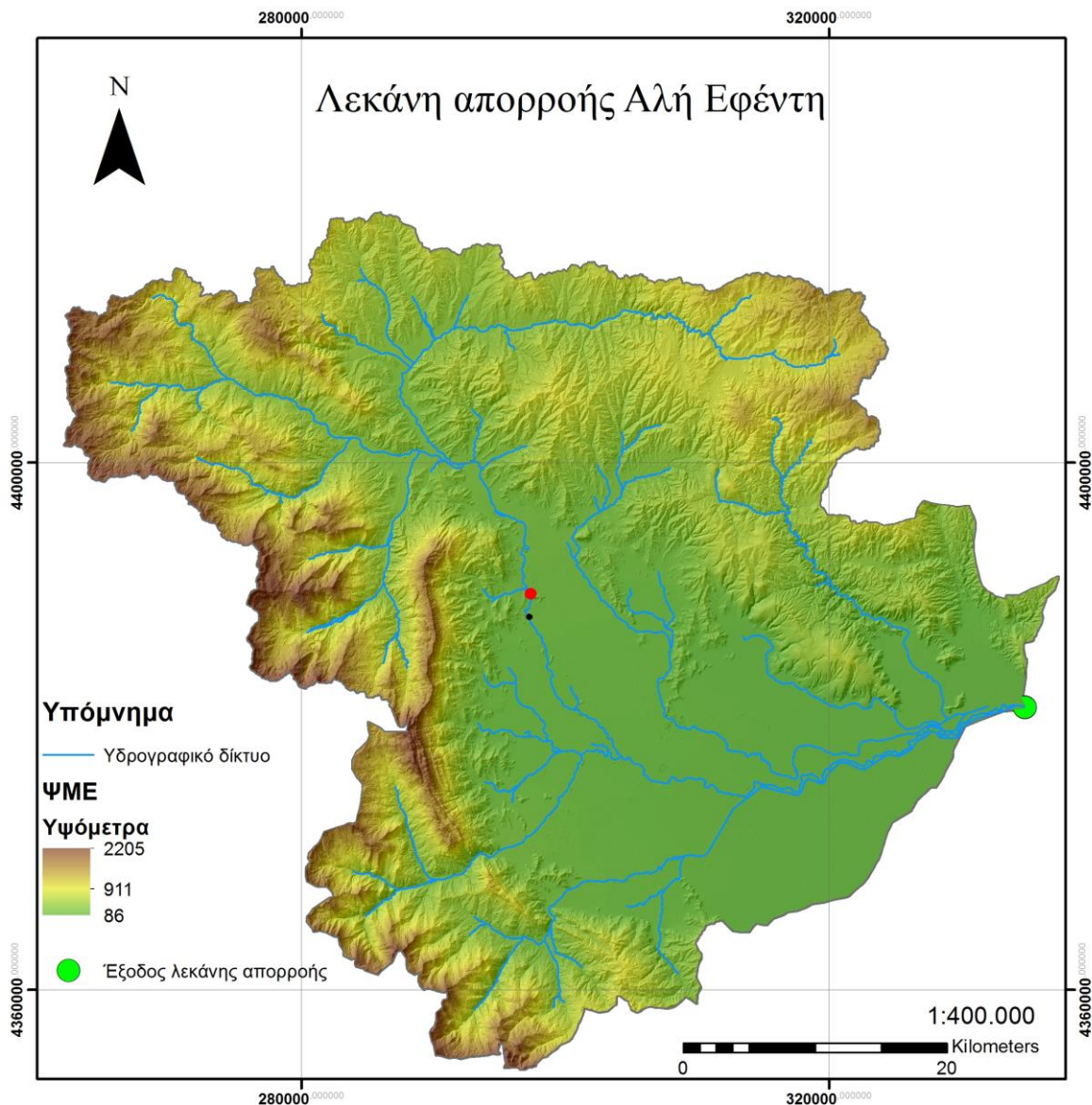
## **2.2 Περιοχή μελέτης**

### **2.2.1 Γενικά**

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε για τρεις λεκάνες απορροής της κεντρικής Ελλάδας, τις λεκάνες Αλή Εφέντη, Πορταϊκού, οι οποίες είναι εγγύς γεωγραφικά περιοχές και αποτελούν υπολεκάνες της λεκάνης απορροής του Πηνειού ποταμού, καθώς και για την λεκάνη Βενέτικου, η οποία βρίσκεται στην βορειοδυτική Ελλάδα. Τα χαρακτηριστικά των λεκανών θα αναφερθούν στο παρών κεφάλαιο.

### **2.2.2 Λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη**

Η λεκάνη όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι υπολεκάνη του ποταμού Πηνειού, έχει έκταση 2778 km<sup>2</sup> και εκτείνεται στους νομούς Τρικάλων, Καρδίτσας και Γρεβενών. Η έξοδος της βρίσκεται στη γέφυρα Αλή Εφέντη στην περιοχή Φαρκαδόνα. Η γεωμορφολογία της λεκάνης ποικίλει, το βόρειο όπως και το δυτικό της τμήμα παρουσιάζει μεγάλα υψόμετρα και έντονες κλίσεις με πυκνή δασώδη βλάστηση, ενώ το νότιο και ανατολικό είναι πεδινά και συναντώνται μεγάλες καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Μια εκτίμηση για την λεκάνη απορροής μπορεί να γίνει από το Σχήμα 2-1.

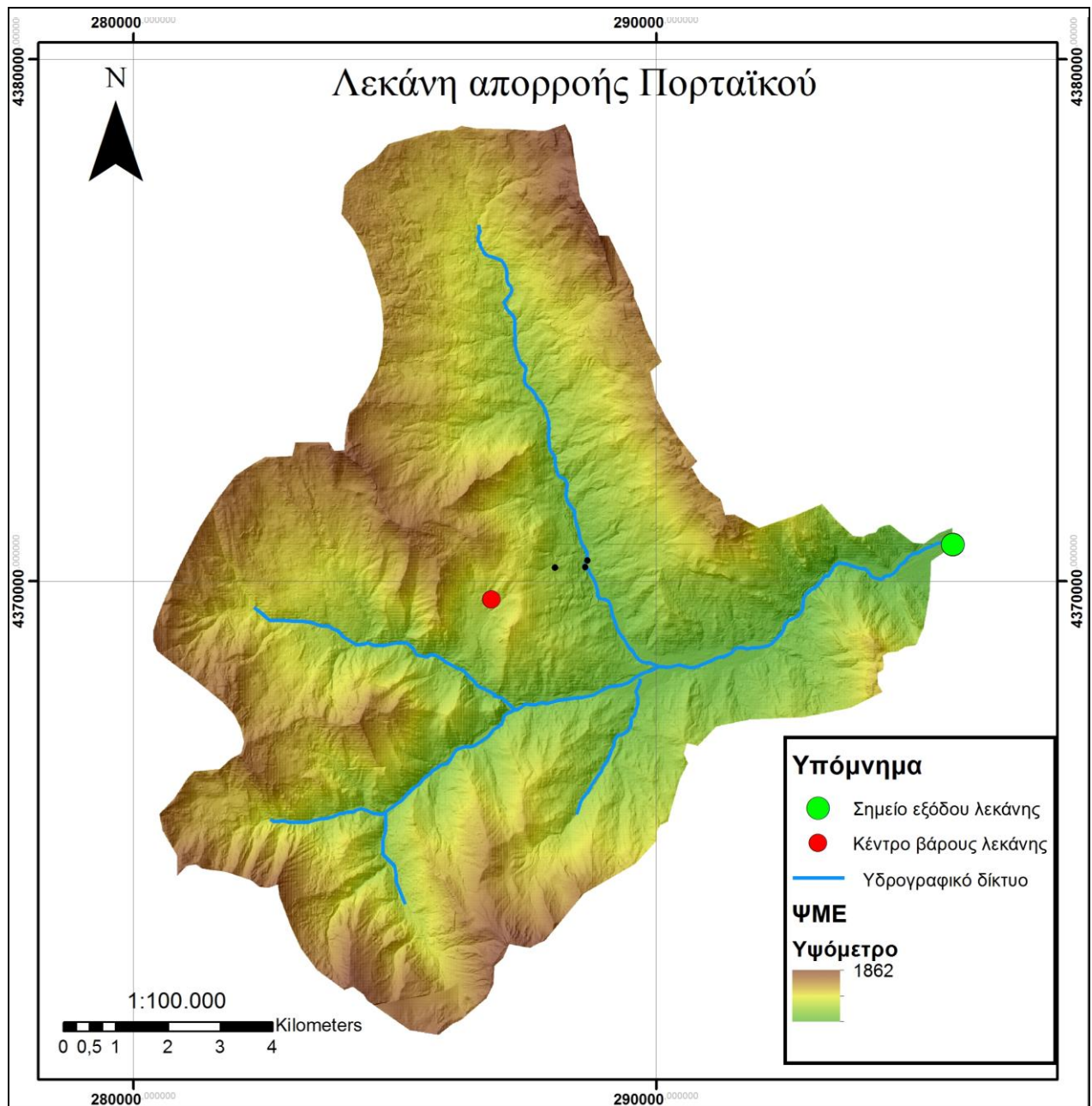


**Σχήμα 2-1: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη και υδρογραφικό δίκτυο**

Στην έκταση της λεκάνης υπάρχουν αρκετά βροχόμετρα και βροχογράφοι.

### **2.2.3 Λεκάνη απορροής Πορταϊκού**

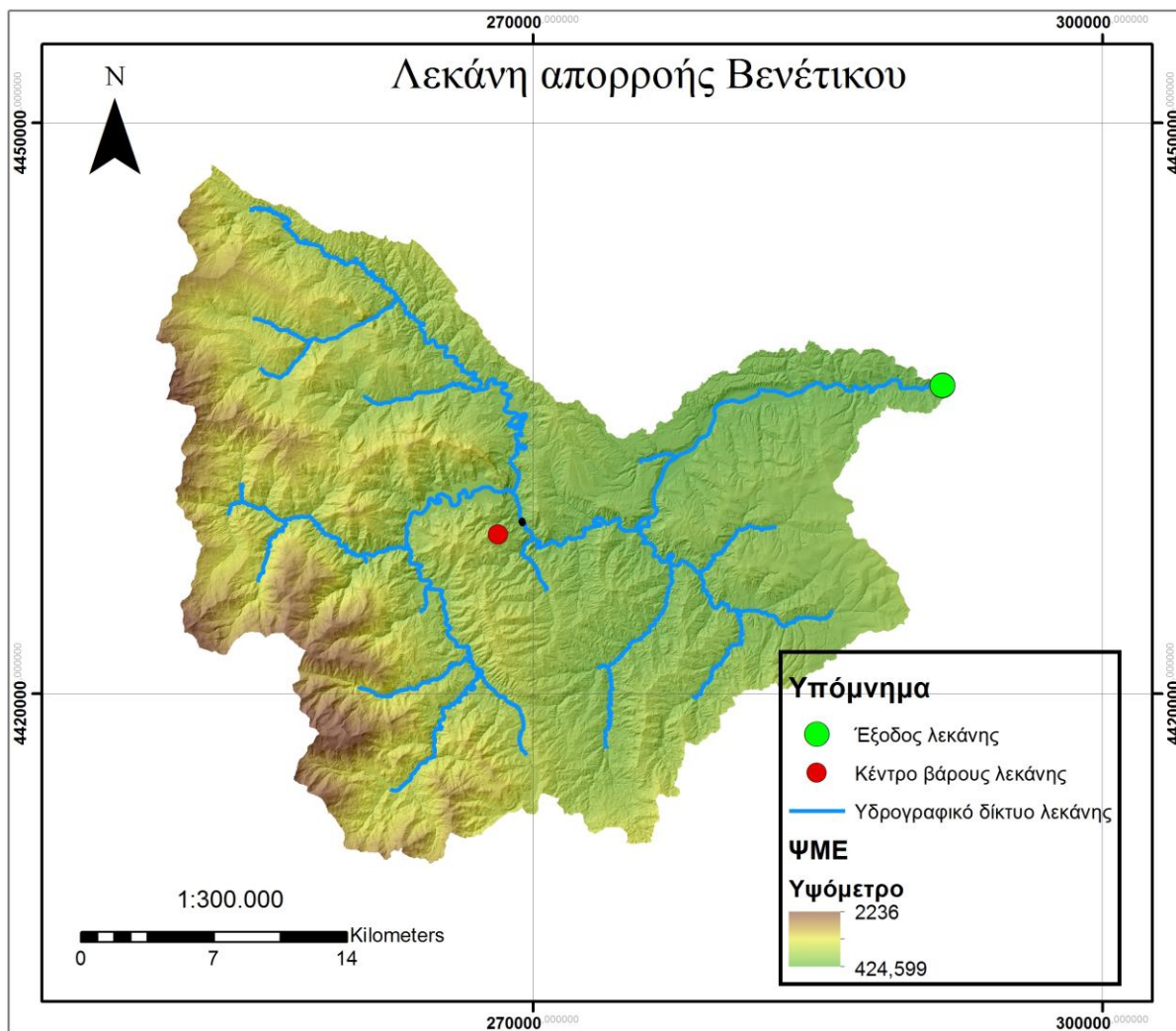
Η λεκάνη της Πύλης, ή Πορταϊκού ποταμού βρίσκεται στον νομό Τρικάλων, είναι υπολεκάνη της λεκάνης απορροή Αλή Εφέντη, έχει έκταση 134 km<sup>2</sup>, και στην έξοδο του ποταμού βρίσκεται το υπό κατασκευή ομώνυμο φράγμα. Η γεωμορφολογία της χαρακτηρίζεται ορεινή με έντονες κλίσεις και η βλάστηση της είναι πυκνή και δασώδης. Στο Σχήμα 2-2 παρουσιάζεται η περιοχή.



Σχήμα 2-2: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υδρογραφικό δίκτυο λεκάνης απορροής Πορταϊκού

#### 2.2.4 Λεκάνη απορροής Βενέτικου

Η λεκάνη απορροής του Βενέτικου ποταμού βρίσκεται στην Βορειοδυτική Ελλάδα, ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα 9, έχει έκταση 850 km<sup>2</sup> και αποτελεί υπολεκάνη του Αλιάκμονα. Η τοπογραφία της παρουσιάζει έντονες μεταβολές αφού συναντώνται έντονες κλίσεις αλλά και ανοικτοί επίπεδοι χώροι. Η βλάστηση στην λεκάνη είναι πυκνή.



Σχήμα 2-3: ΨΜΕ λεκάνης απορροής Βενέτικου με υδρογραφικό δίκτυο

## 2.3 Εδαφολογικά χαρακτηριστικά λεκανών απορροής

### 2.3.1 Γενικά

Τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά επιδρούν σημαντικά στον υπολογισμό του υδρολογικού ελλείμματος, τις απώλειες βροχής.

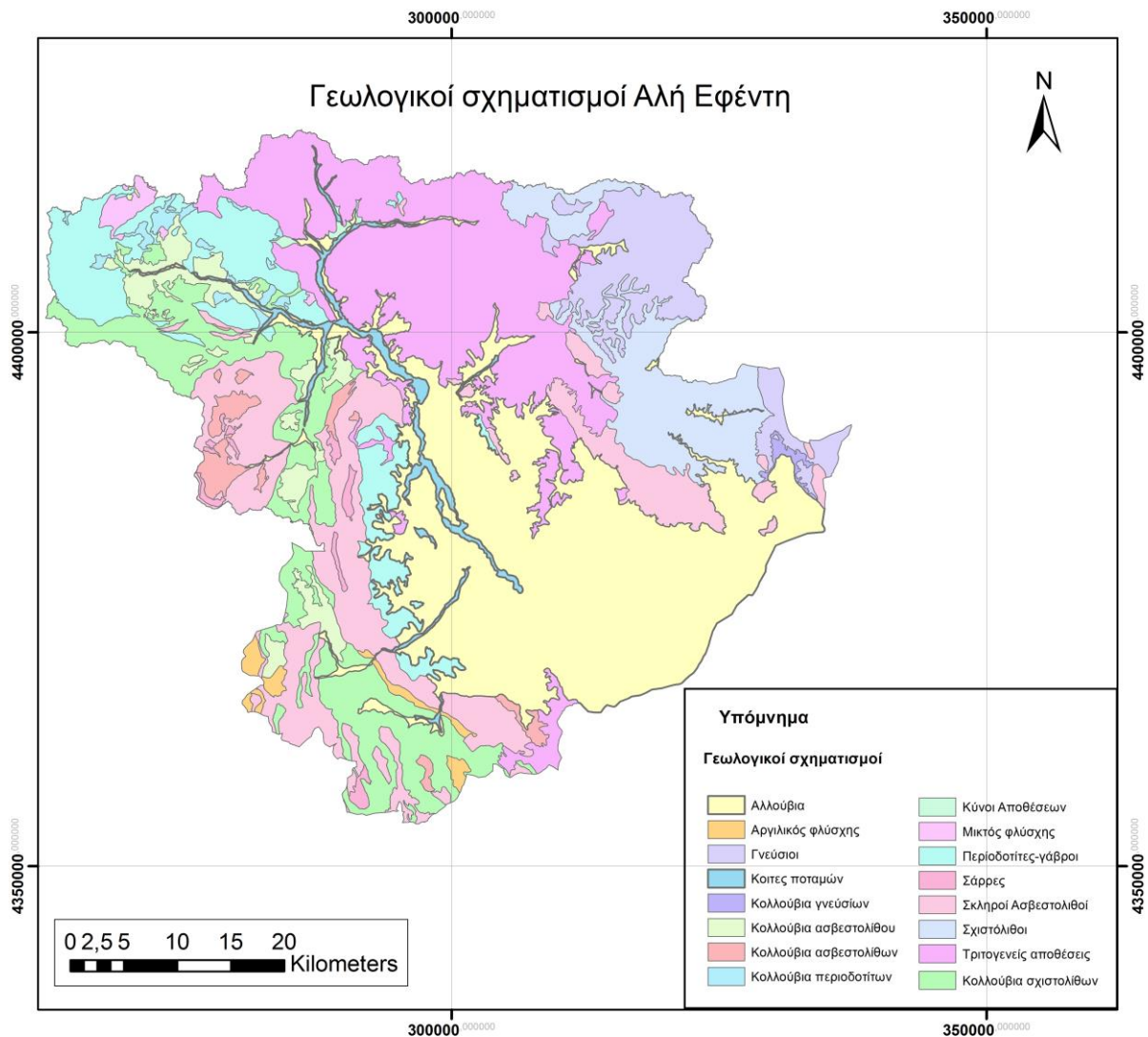
Οι ιδιότητες των πετρωμάτων και των γεωλογικών σχηματισμών επιδρούν άμεσα στην εκτίμηση της απορροής. Για παράδειγμα, εδάφη κατά την μέθοδο υπολογισμού περισσεύματος βροχής της μεθόδου SCS, για τον υπολογισμό του συντελεστή απορροής CN τα εδάφη, ανάλογα με την διηθητικότητα τους, την διαπερατότητα τους αλλά και την κοκκομετρία τους κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες. Σημαντικό ρόλο εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, έχουν και οι χημικές, οι οποίες

καθορίζουν την φυτοκάλυψη και την χλωρίδα της περιοχής, παράγοντες που επηρεάζουν την κατακράτηση και την διήθηση, από τις οποίες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό οι απώλειες βροχής.

### 2.3.2 Εδαφολογικοί χάρτες λεκανών απορροής περιοχών μελέτης

➤ Λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη

Οι επικρατέστεροι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην λεκάνη απορροής του Αλή Εφέντη είναι στο νότιο τμήμα της, το οποίο χαρακτηρίζεται και πολύ ορεινό, τα αλλούβια, ενώ στο βόρειο τμήμα διακρίνονται οι τριτογενείς αποθέσεις.

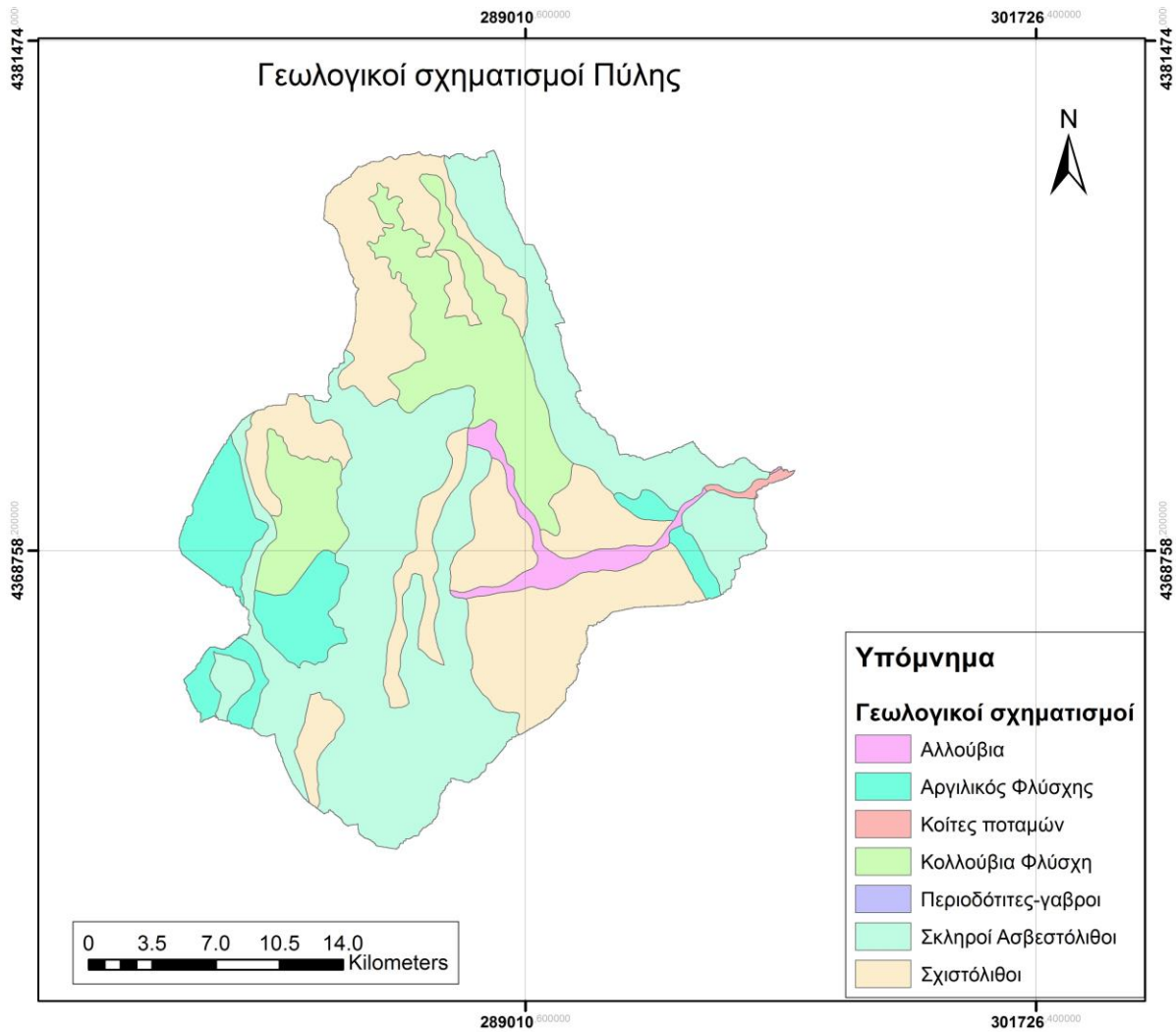


Σχήμα 2-4: Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη

➤ Λεκάνη απορροής Πορταϊκού

Στην λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού, όπως παρατηρούμε και στο Σχήμα 2-5 κυριαρχούν οι σχιστόλιθοι και οι σκληροί ασβεστόλιθοι.

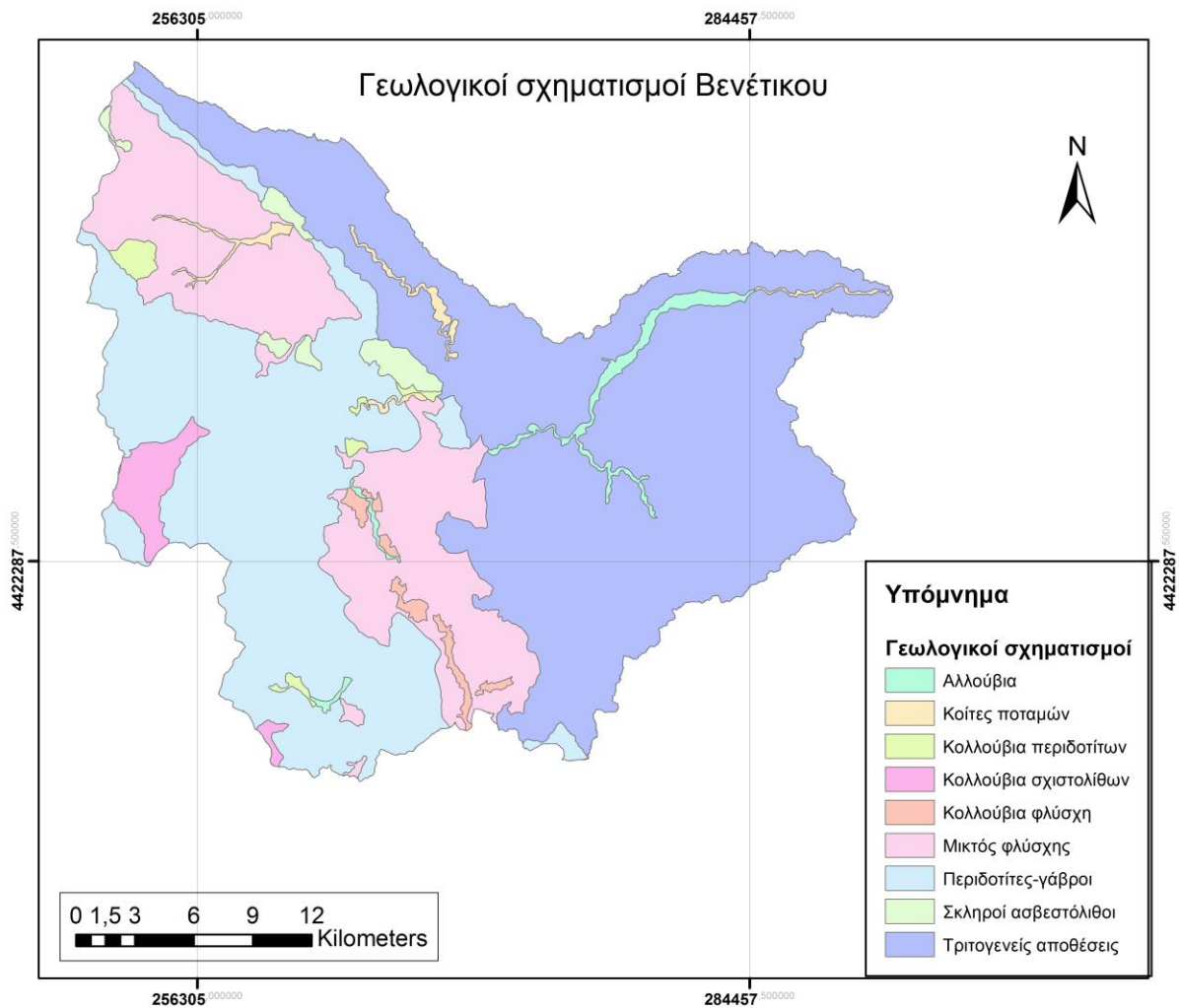




**Σχήμα 2-5: Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής Πορταϊκού**

➤ Λεκάνη απορροής Βενέτικου

Στην λεκάνη απορροής του Βενέτικου ποταμού, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2-6, η λεκάνη εμφανίζει δύο επικρατέστερους γεωλογικούς τύπους, στο δυτικό τμήμα της σκληρούς ασβεστόλιθους, ενώ στο ανατολικό τριτογενείς αποθέσεις.



Σχήμα 2-6: Γεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής Βενέτικου

## 2.4 Επικρατούσες χρήσεις γης λεκανών απορροής

### 2.4.1 Γενικά

Οι χρήσεις γης επηρεάζουν την απορροή της λεκάνης ύστερα από βροχόπτωση. Η αλματώδη επέκταση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, φαινόμενα πυρκαγιών, κάνουν την τακτική χρονικά απεικόνιση των χρήσεων γης αλλά και των μεταβολών τους, αναγκαίες. Οι χάρτες χρήσεων γης που θα παρουσιαστούν παρακάτω λήφθηκαν σε μορφή shapefile από τον ιστότοπο της ΕΚΧΑ Α.Ε. Οι χάρτες αναφέρονται στο 2012, με την υποσημείωση ότι ο έλεγχος ποιότητας τους από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (Ε.Ο.Π) εκκρεμεί.

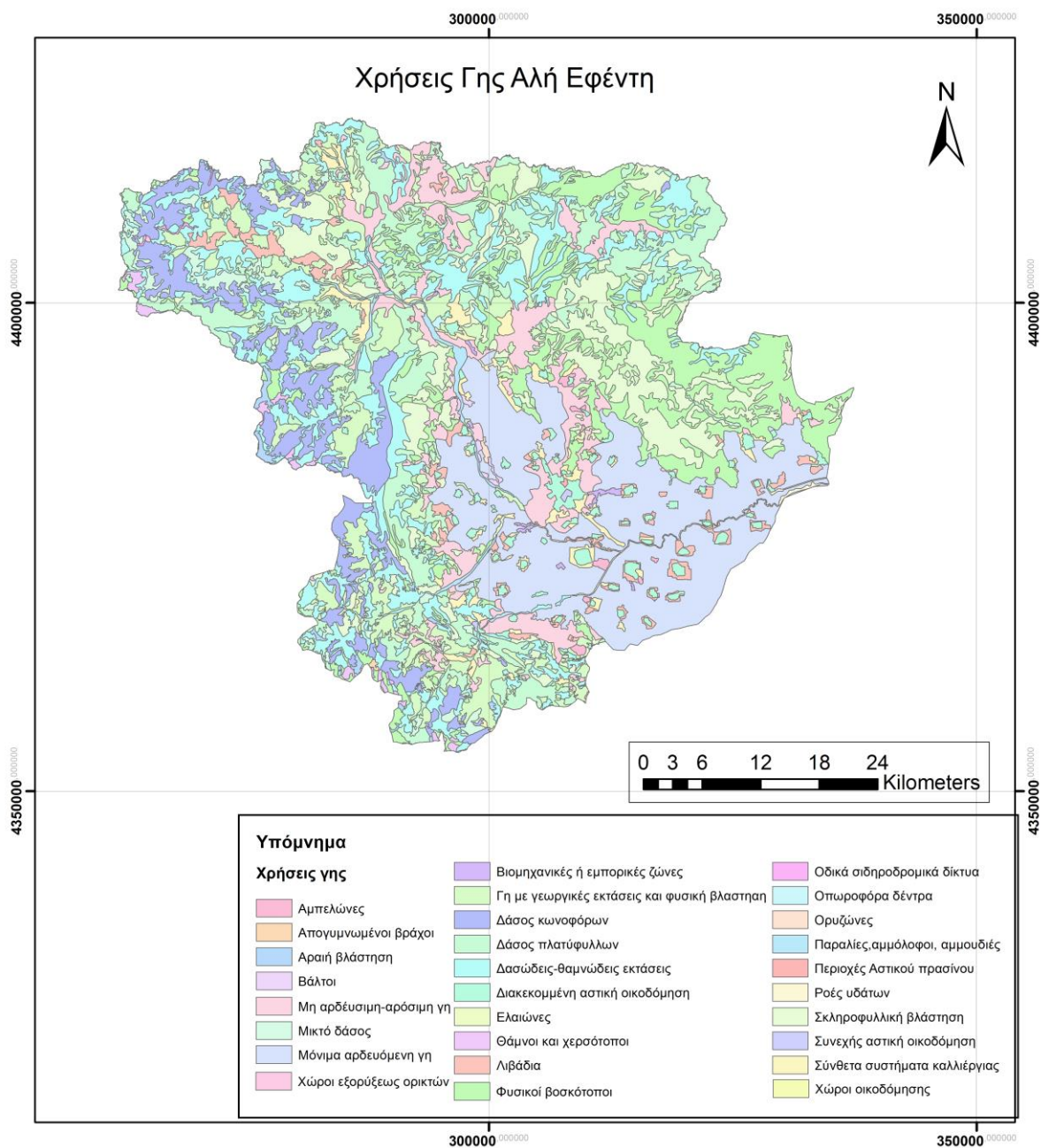
Στην παρούσα μελέτη, βάση των χρήσεων γης έγινε και μια εκτίμηση για τον συντελεστή  $k$ , ο οποίος προσεγγίζει για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης τον συντελεστή τραχύτητας του εδάφους. Κάθε χρήση γης, αντιστοιχίζεται με μια τιμή του συντελεστή τραχύτητας. Το βήμα αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για επόμενο στάδιο της μελέτης. Συνοπτικά, οι δομημένες επιφάνειες όπως αστικές και

βιομηχανικές λαμβάνουν την τιμή 200, απόκρημνοι βράχοι, εκβολές ποταμών, και κάποιες καλλιέργειες όπως αμπελώνες και ορυζώνες λαμβάνουν μια πιο ήπια τιμή, 90 με 100, Ενώ περιοχές με μικρή γεωργία, λιβάδια, φυσική βλάστηση τιμές 50 με 70 και τέλος στις περιοχές που συναντώνται δάση και σκληροφυλλική βλάστηση, δίνεται η μικρότερη τιμή, 25 (Καβαβαδά, 2012).

## 2.4.2 Χάρτες χρήσεων γης

➤ Λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη

Στη λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη επικρατούσα χρήση γης παρουσιάζεται να είναι η μόνιμα αρδευόμενη γη και στην συνέχεια τα δάση πλατύφυλλων. Στο Σχήμα 2-7 παρουσιάζονται οι χρήσεις γης και στον Πίνακα 2-1 οι τιμές του συντελεστή  $k$  και το ποσοστό των χρήσεων γης.



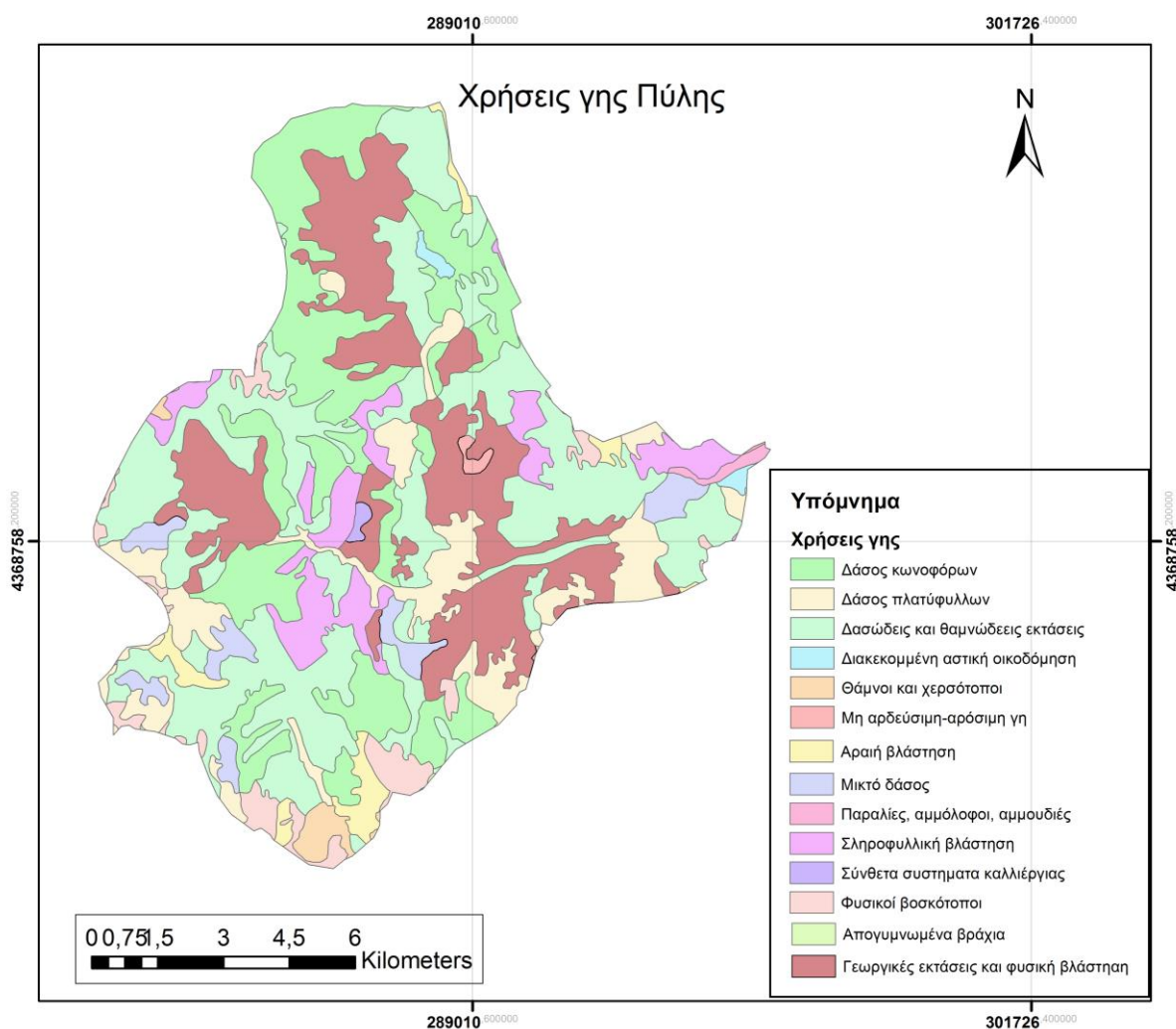
Σχήμα 2-7: Χρήσεις γης λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη

**Πίνακας 2-1: Χρήσεις γης, ποσοστό κάλυψης και συντελεστής k**

Χρήσεις γης	Ποσοστό Επιφάνειας %	Συντελεστής k*100
Συνεχής αστική οικοδόμηση	0,04	200
Περιοχές Αστικού πρασίνου	0,01	50
Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	2,03	200
Μη αρδύσιμη-αρόσιμη γη	7,38	90
Ορυζώνες	0,05	90
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	2,33	90
Λιβάδια	2,20	70
Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	0,17	200
Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα	0,05	200
Χώροι εξορύξεως ορυκτών	0,02	100
Χώροι οικοδόμησης	0,02	200
Οπωροφόρα δέντρα	0,04	90
Μόνιμα αρδευόμενη γη	17,74	70
Αμπελώνες	0,21	90
Ελαιώνες	0,05	90
Δάσος πλατύφυλλων	12,47	25
Φυσικοί βοσκότοποι	11,84	70
Γεωργικές εκτάσεις και φυσική βλάστηση	9,06	50
Μικτό δάσος	1,72	25
Δάσος κωνοφόρων	7,29	25
Απογυμνωμένοι βράχοι	0,02	100
Σκληροφυλλική βλάστηση	10,24	25
Δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	13,03	50
Θάμνοι και χερσότοποι	0,49	70
Αραιή βλάστηση	0,47	50
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0,67	100
Βάλτοι	0,13	100
Ροές υδάτων	0,22	100
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>100,00</b>	

➤ Λεκάνη απορροής Πορταϊκού ποταμού

Όπως γίνεται αντιληπτό στο Σχήμα 2-8 και στον Πίνακα 2-2 στην λεκάνη επικρατέστερες χρήσεις γης είναι δασώδης και θαμνώδης εκτάσεις και στην συνέχεια δάσος κωνοφόρων.



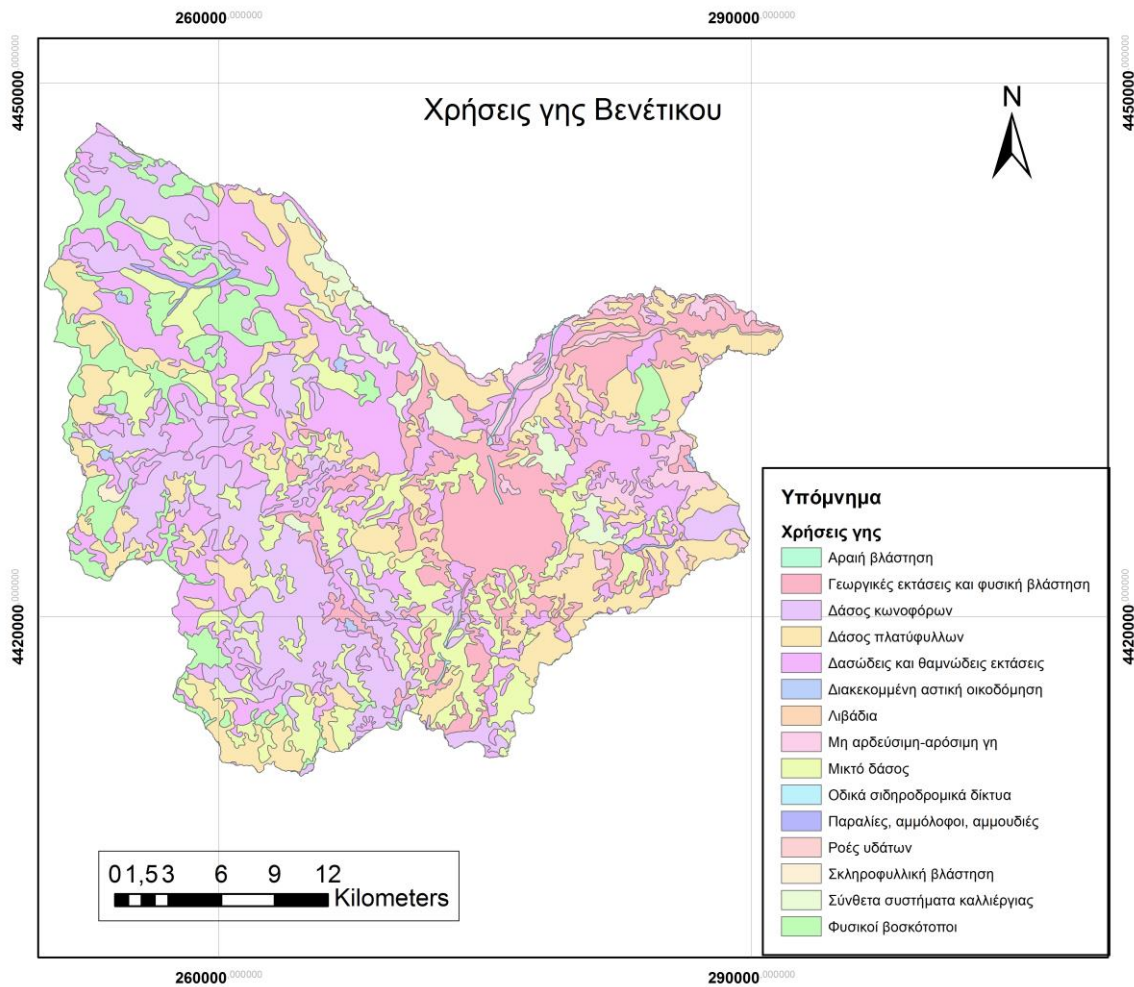
Σχήμα 2-8: Χάρτης χρήσεων γης λεκάνης απορροής Πορταϊκού ποταμού

**Πίνακας 2-2: Χρήσεις γης λεκάνης απορροής Πορταϊκού και συντελεστής k**

Χρήσεις γης	Ποσοστό Επιφάνειας %	Συντελεστής k*100
Μη αρδεύσιμη - αρόσιμη γη	0,28	90
Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	0,45	200
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	0,20	90
Μικτό δάσος	3,16	25
Γη με γεωργικές εκτάσεις και φυσική βλάστηση	20,89	50
Δάσος πλατύφυλλων	9,91	25
Δάσος κωνοφόρων	20,50	25
Απογυμνωμένα βράχια	0,01	100
Φυσικοί βοσκότοποι	3,30	70
Θάμνοι και χερσότοποι	0,95	70
Σκληροφυλλική βλάστηση	6,69	25
Δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	31,08	50
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	0,37	100
Αραιή βλάστηση	2,21	50
ΣΥΝΟΛΟ	100,00	

➤ Λεκάνη απορροής ποταμού Βενέτικου

Από την επεξεργασία των δεδομένων για την περιοχή του Βενέτικου προέκυψε ότι η επικρατέστερη χρήση γης είναι η γεωργία και η φυσική βλάστηση με μεγάλο ποσοστό. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2-9 και στον Πίνακα 2-3, όπου συμπεριλαμβάνονται και οι συντελεστές τραχύτητας.



**Σχήμα 2-9: Χρήσεις γης λεκάνης απορροής Βενέτικου**

**Πίνακας 2-3: Κατανομή χρήσεων γης και τιμές συντελεστή k\*100**

Χρήσεις γης	Ποσοστό Επιφάνειας %	Συντελεστής k*100
Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	1,40	200
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	6,36	90
Λιβάδια	1,28	70
Μη αρδεύσιμη-αρόσιμη γη	3,93	90
Οδικά σιδηροδρομικά δίκτυα	1,15	200
Φυσικοί βοσκότοποι	8,37	50
Εκβολές ποταμών	2,31	70
Δάσος κωνοφόρων	3,49	25
Δάσος πλατύφυλλων	1,08	25
Μικτό δάσος	16,66	25
Δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	1,37	50
Σκληροφυλλική βλάστηση	4,71	25
Παραλίες, αμμόλοφοι, αμμουδιές	2,17	100
Αραιή βλάστηση	2,51	50
Γεωργικές εκτάσεις και φυσική βλάστηση	43,14	100
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>100</b>	



## 3 Μεθοδολογία

---

### 3.1 Μοναδιαία υδρογραφήματα

Ως μοναδιαίο υδρογράφημα διάρκειας περισσέυματος βροχής  $t_r$  ομοιόμορφα κατανεμημένης βροχόπτωσης σε μια λεκάνη απορροής ονομάζεται το αντίστοιχο υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προήλθε από περίσσειμα βροχής  $h_r=1$  cm. Το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο που περικλείει όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και αναφέρεται στην συγκεκριμένη διάρκεια περισσέυματος βροχής. Για κάθε δηλαδή διάρκεια περισσέυματος βροχόπτωσης υπάρχει και ένα μοναδιαίο υδρογράφημα το οποίο αποτελεί την βάση για υπολογισμό του υδρογραφήματος άμεσης απορροής από οποιοδήποτε ύψος περισσέυματος της ίδιας διάρκειας.

Η χρησιμότητα του είναι μεγάλη γιατί όπως θα αποδειχθεί παρακάτω μπορεί να μετασχηματιστεί κάτω από ορισμένες παραδοχές οποιοδήποτε περίσσειμα βροχής διαφορετικής έστω διάρκειας σε υδρογράφημα της άμεσης απορροής.

Οι αρχές που στηρίζεται η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι οι ακόλουθες:

1. Αρχή της αναλογίας: Σύμφωνα με αυτή δύο βροχές με περίσσειμα βροχόπτωσης της ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις περισσέυματος βροχόπτωσης δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες κάθε στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων. Δηλαδή, για εντάσεις με λόγο  $k$  μεταξύ τους αλλά και της ίδιας διάρκειας, προκύπτουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής (ΥΑΑ) με τεταγμένες που έχουν λόγο  $k$  και την ίδια χρονική βάση  $T$ .
2. Αρχή της Επαλληλίας: Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το συνολικό ΥΑΑ που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των ΥΑΑ των επιμέρους βροχοπτώσεων.

Οι παραπάνω αρχές πηγάζουν ουσιαστικά από τις ακόλουθες παραδοχές (Linsley et al., 1949) που αποτελούν και προϋποθέσεις για την χρήση του μοναδιαίου υδρογραφήματος:

- 1) Η κατανομή του περισσέυματος της βροχής στο χώρο και στο χρόνο είναι ίδια για βροχές με την ίδια διάρκεια.
- 2) Η ένταση της βροχής είναι σταθερή κατά τη διάρκεια του γεγονότος της βροχής.
- 3) Δύο ραγδαίες βροχές της ίδιας διάρκειας αλλά διαφορετικού ύψους περισσέυματος βροχής δημιουργούν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με τεταγμένες ανάλογες των υψών περισσέυματος βροχής (Συνθήκη Γραμμικότητας – linearity).

4) Από δύο ραγδαίες βροχές με το ίδιο ύψος περισσεύματος της βροχής και την ίδια διάρκεια που συμβαίνουν σε διαφορετικούς χρόνους προκύπτουν εντελώς όμοια μοναδιαία υδρογραφήματα (Συνθήκη στασιμότητας - time invariance).

5) Για μια λεκάνη απορροής το σχήμα του μοναδιαίου υδρογραφήματος δεδομένης διάρκειας βροχής αντιπροσωπεύει τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (Τσακίρης 1995).

Ακόμα η κατάσταση της υδρολογικής λεκάνης παραμένει αμετάβλητη στον χρόνο.

Θεωρητικά, θα έπρεπε να δημιουργηθούν απεριόριστα μοναδιαία υδρογραφήματα εξαιτίας των πολλών πιθανών τιμών διάρκειας και κατανομής της βροχής. Ο ορισμός μιας τυπικής διάρκειας βροχής με το υδρογράφημα που προκαλεί για κάθε λεκάνη απορροής μέσω κάποιων κριτηρίων, χρησιμοποιείται ως αντιπροσωπευτική για κάθε λεκάνη.

Ο Sherman (1949) προτείνει η επιλογή της διάρκειας της τυπικής βροχόπτωσης να είναι ανάλογη του μεγέθους της λεκάνης απορροής. Πιο συγκεκριμένα, για μεγάλες λεκάνες (<2500 km<sup>2</sup>) προτείνεται διάρκεια 12 με 24 ώρες, για μεσαίες λεκάνες (250 km<sup>2</sup> < έκταση <2500 km<sup>2</sup>) 6 έως 12 ώρες, για μικρές (50 km<sup>2</sup> έως 250 km<sup>2</sup>) από 2 έως 6 ώρες. Για ακόμα μικρότερες λεκάνες η διάρκεια πρέπει να επιλέγεται σαν το 1/3 ή το 1/4 του χρόνου συγκέντρωσης της λεκάνης. Από μελέτη (Linsley et al, 1949), έδειξαν ότι η διάρκεια της τυπικής μορφής πρέπει να είναι το 1/4 του χρόνου υστέρησης της λεκάνης ακόμα, ότι για μικρές λεκάνες απορροής, η διάρκεια της τυπικής βροχής πρέπει να είναι το μισό του χρόνου υστέρησης (Παπαμιχαήλ, 2001).

### 3.2 Υπολογισμός ΜΥΓ από παρατηρημένα υδρογραφήματα

Για τον προσδιορισμό του ΜΥΓ ορισμένης διάρκειας για μια λεκάνη απορροής απαραίτητα δεδομένα είναι οι ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχόπτωσης και του πλημμυρογραφήματος που δημιουργεί. Επιλέγονται συνήθως μεμονωμένες βροχές μεγάλης έντασης (σχετικά σταθερής) με ομοιόμορφη κατανομή στην επιφάνεια της λεκάνης και με συνολικό όγκο απορροής από 1 έως 4 cm. Για να επιτευχθεί η σταθερή ένταση προτιμώνται μικρές διάρκειες που δεν υπερβαίνουν το 25% της διάρκειας του κλάδου ανόδου του πλημμυρογραφήματος.

Η διαδικασία είναι η εξής:

1. Διαχωρισμός της απορροής σε άμεση και βασική
2. Υπολογισμός του ύψους άμεσης απορροής

$$h_R = 0.36 \frac{\Delta t}{A} \sum_1^n R_i \quad (3.1)$$

Όπου,  $\Delta t$ , το χρονικό βήμα μεταξύ δύο διαδοχικών τεταγμένων.

3. Διαίρεση των τεταγμένων του υδρογραφήματος άμεσης απορροής δια του ύψους  $h_R$  σε cm. Το προκύπτον υδρογράφημα έχει  $h_R=1$  cm είναι το ΜΥΓ της διάρκειας περισεύματος βροχής από την οποία προήλθε.

Επειδή τα υδρομετρικά διαθέσιμα δεδομένα δεν είναι κατάλληλα για όλες τις διάρκειες βροχής προκειμένου να εξαχθεί ΜΥΓ όλων των διαρκειών, χρησιμοποιούνται βροχές και απορροές άλλων διαρκειών και μετατροπή τους στην επιθυμητή διάρκεια μέσω της καμπύλης  $S$ .

Στην πράξη ωστόσο, η ύπαρξη φυσικών υδρογραφημάτων από μεμονωμένες βροχοπτώσεις είναι σπάνιος, για αυτό τον λόγο επιλέγονται οι λιγότερο περίπλοκες σύνθετες βροχές (Τσακίρης, 2005).

### 3.3 Συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα

Λόγω της έλλειψης, ιδιαίτερα για την χώρα μας, δεδομένων σταθμηγράφου, δηλαδή μετρήσεων παροχών, κατάλληλων βροχοπτώσεων, αλλά και δυσκολία επίτευξης των υπολοίπων συνθηκών (κορεσμένο έδαφος), μοναδιαία υδρογραφήματα μπορούν να προσδιοριστούν συνθετικά από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα αναφερθεί το θεωρητικό υπόβαθρο των μεθόδων κατάρτισης συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων στην παρούσα εργασία.

#### 3.3.1 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Snyder

Η μέθοδος κατάρτισης συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά Snyder (1938) που χρησιμοποιείται ευρέως στην Ελλάδα έχει αναπτυχθεί ύστερα από αναλύσεις μεγάλου αριθμού βροχοπτώσεων στην περιοχή των Απαλλαχίων στην Βόρεια Αμερική. Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει το χρόνο υστέρησης  $t_p$ , την παροχή αιχμής,  $Q_p$ , το χρόνο βάσης  $T$  και τα πλάτη του ΜΥΓ  $W_{50}$  και  $W_{75}$  σε χρόνο που αντιστοιχεί στο 50% και 75% της αιχμής (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006)

Οι εξισώσεις που διέπουν το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder είναι:

$$t_p = 0.75C_i(L_{CA}L)^{0.3} \quad (h) \quad (3.2)$$

$$Q_p = C_p \frac{2.75A}{t_p} \quad (m^3 / s) \quad (3.3)$$

$$T = 3 + 3\left(\frac{t_p}{24}\right) \quad (days) \quad (3.4)$$

Όπου:

$L_{CA}$ : η απόσταση της εξόδου της λεκάνης από το κέντρο βάρους της λεκάνης κατά μήκος της κοίτης του κυρίου υδατορέματος έως το πλησιέστερο σημείο του κέντρου βάρους (km)

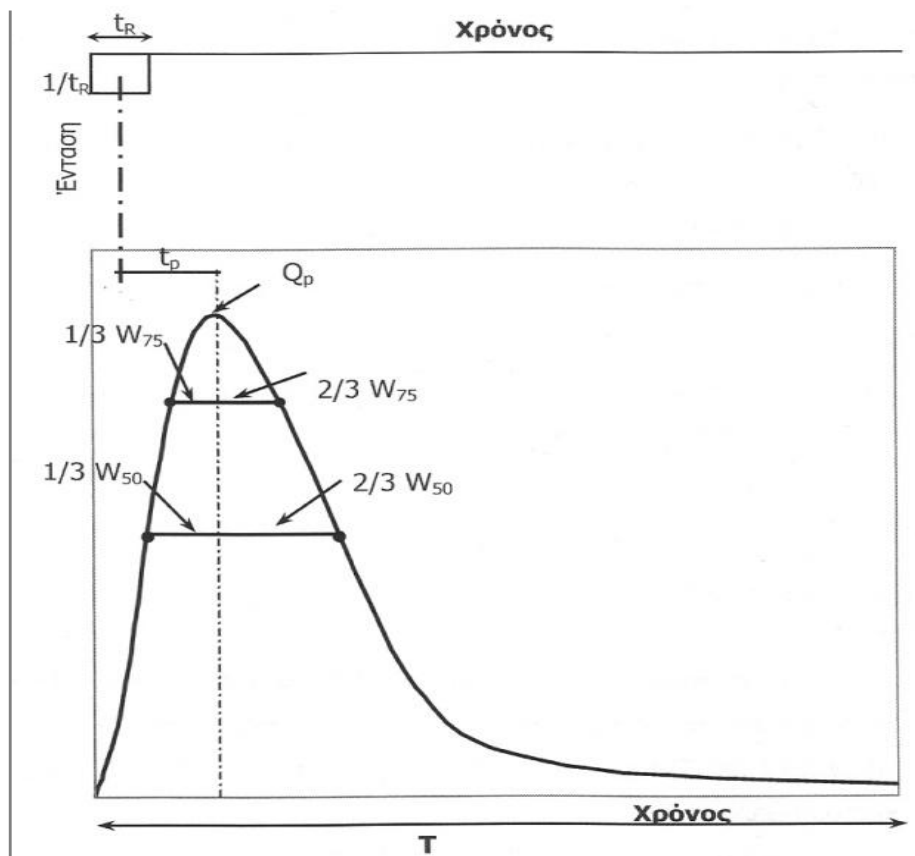
$L$ : η απόσταση του σταθμού μέτρησης ως τον υδροκρίτη, που μετριέται κατά μήκος του κύριου υδατορέματος (km)

$C_t$ : αδιάστατος συντελεστής που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης με εύρος τιμών από 1.8 έως 2.2. Για τιμές μεγάλων κλίσεων η τιμή του  $C_t$  τείνει προς τη χαμηλότερη τιμή

$C_p$ : αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης με εύρος τιμών από 0.56 έως 0.69.

$A$ : η έκταση της λεκάνης απορροής (km<sup>2</sup>)

$T$ : η χρονική βάση του υδρογραφήματος. Ως ελάχιστη τιμή από την εξίσωση δίνονται οι τρεις ημέρες



Σχήμα 3-1: Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder

Ο χρόνος υστέρησης μετριέται από το κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης μέχρι την αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Η διάρκεια ενεργού βροχόπτωσης  $t_R$ , συνδέεται με την χρονική υστέρηση μέσω της σχέσης:

$$t_R = \frac{t_p}{5.5} \quad (h) \quad (3.5)$$

Εφόσον η διάρκεια βροχής  $t_R$  που χρησιμοποιείται είναι διαφορετική, τότε για την εκτίμηση του χρόνου ανόδου εφαρμόζεται η απλή σχέση αναγωγής (Chow et al., 1988, p.225):

$$t_{pR}' = t_p - \frac{tp/5.5-t_R}{4} \quad (h) \quad (3.6)$$

Η διορθωμένη αυτή τιμή του χρόνου υστέρησης πρέπει να αντικατασταθεί στις αρχικές σχέσεις και να υπολογιστούν οι διορθωμένες τιμές των  $Q_p$  και  $T$ .

Τα πλάτη του ΜΥΓ στο 50% και 75% της αιχμής του δίνονται από τις σχέσεις:

$$W_{50} = \frac{2.143}{Q_p^{1.09}} \quad (3.7)$$

$$W_{75} = \frac{1.225}{Q_p^{1.08}} \quad (3.8)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές των δεικτών  $C_q$ ,  $C_t$  έχουν μεγάλο εύρος όπως αποδείχθηκε από άλλες έρευνες. Ο ίδιος ο Snyder σε μελέτες που εκπόνησε στην Ελλάδα (Αραχθος, φράγμα Πουρνάρι)  $C_t$  υιοθέτησε πολύ πιο δυσμενή τιμή συγκεκριμένα  $C_t=1.00$  (αντίστοιχα έθεσε  $C_q=0.72$ ). Πράγματι, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας και Ηπείρου, ευνοούν τη δημιουργία έντονων πλημμυρικών επεισοδίων, με μικρούς χρόνους συρροής και ανόδου πλημμύρας. Αυτό καταδεικνύεται από τις εξαιρετικά υψηλές τιμές του συντελεστή απορροής τους, που ακόμα και σε ετήσια κλίμακα ξεπερνούν το 70% (Κουτσογιάννης και Σωτηρόπουλος, 2003)

### 3.3.2 Αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS

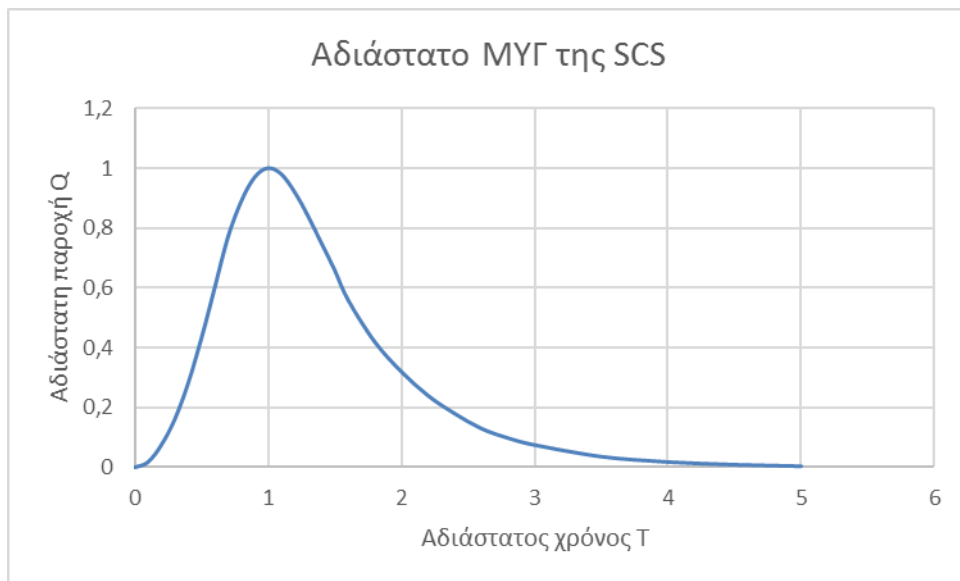
Η μέθοδος του αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS, της υπηρεσίας συντήρησης των εδαφών του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ, αναπτύχθηκε με την μελέτη πολλών μοναδιαίων υδρογραφημάτων λεκανών απορροής με διαφορετικό μέγεθος και διαφορετικών περιοχών (SCS 1972). Στο αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα, η αδιάστατη παροχή εκφράζεται ως αναλογία της παροχής του συνθετικού και της παροχής αιχμής και ο αδιάστατος χρόνος ως αναλογία του χρόνου του συνθετικού και του χρόνου αιχμής. Μέσω λοιπόν του αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος, με τον υπολογισμό, από τύπους οι οποίοι θα αναφερθούν παρακάτω, της παροχής αιχμής αλλά και του χρόνου υστέρησης είναι δυνατή η εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος λεκάνης απορροής για δεδομένη χρονική διάρκεια.

Το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα (παρουσιάζεται στον Πίνακα 3-1 και στο Σχήμα 3-2), που αναπτύχθηκε από την μελέτη γεωργικών λεκανών απορροής, τοποθετεί το χρόνο αιχμής  $t_p$  στο 20%

περίπου του χρόνου βάσης  $t_b$  και εμφανίζει σημείο καμπής σε χρόνο  $1.7 t_p$ . Επίσης το 37.5% της συνολικής επιφάνειας του υδρογραφήματος βρίσκεται προς την πλευρά της καμπύλης ανόδου.

**Πίνακας 3-1; Αδιάστατο ΜΥΓ κατά SCS**

Αδιάστατος χρόνος $t_p$	Αδιάστατη παροχή $Q_d$
0	0
0.1	0.0175
0.2	0.075
0.3	0.16
0.4	0.28
0.5	0.43
0.6	0.6
0.7	0.77
0.8	0.89
0.9	0.97
1	1
1.1	0.98
1.2	0.92
1.3	0.84
1.4	0.75
1.5	0.66
1.6	0.56
1.8	0.42
2	0.32
2.2	0.24
2.4	0.18
2.6	0.13
2.8	0.098
3	0.075
3.5	0.036
4	0.018
4.5	0.009
5	0.004
...	...
$\infty$	0



**Σχήμα 3-2: Αδιάστατο MYΓ κατά SCS**

Τα βήματα που ακολουθούνται για τον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι τα εξής:

- Προσδιορισμός χρόνου ανόδου

$$t_p = \frac{t_R}{2} + t_L \quad (h) \quad (3.9)$$

- Χρόνος υστέρησης

Ο χρόνος υστέρησης μπορεί να υπολογιστεί με τους τύπους είτε της SCS είτε του Kirpich είτε του Snyder. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο τύπος του Snyder (Παπαμιχαήλ 2001)

$$t_L = 0.756C_i(LL_{CA})^{0.3} \quad (3.10)$$

Οι παράμετροι του τύπου έχουν επεξηγηθεί στο προηγούμενο υποκεφάλαιο

- Παροχή αιχμής

$$Q_p = 2.08 \frac{Ah_s}{t_p} \quad (m^3 / s) \quad (3.11)$$

Όπου:

$Q_p$ : παροχή αιχμής  $m^3/s$

$A$ : έκταση λεκάνης απορροής  $km^2$

$h_s$ : απορροϊκό ύψος βροχής (mm)

$t_p$ : χρόνος ανόδου (h)

Με γνωστά τα παραπάνω μεγέθη, μπορεί να προσδιοριστεί το μοναδιαίο υδρογράφημα που αντιστοιχεί σε απορροϊκή βροχόπτωση ύψους 10 mm. Η παροχή του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος δίνεται από την σχέση:

$$Q_d = \frac{Q}{Q_p} \quad (3.12)$$

Όπου

$Q_d$ : η αδιάστατη παροχή (m<sup>3</sup>/s)

$Q$ : η παροχή του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος σε χρόνο  $t$

$Q_p$ : η παροχή αιχμής (m<sup>3</sup>/s)

Ο χρόνος του αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος δίνεται από την σχέση:

$$t_d = \frac{t}{t_p} \quad (3.13)$$

Όπου:

$t_d$ : ο αδιάστατος χρόνος

$t$ : ο χρόνος στο συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα (h)

$t_p$ : ο χρόνος αιχμής (h)

Επειδή η μέθοδος αναπτύχθηκε για μικρές λεκάνες είναι θεμιτό να χρησιμοποιείται σε παρόμοιες ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή της βροχόπτωσης, σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να γίνεται διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε υπολεκάνες.

### 3.3.3 Συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα Sierra Nevada

Η μέθοδος του αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος της περιοχής της Sierra Nevada (USDI 1987) περιγράφεται αναλυτικά στο σύγγραμμα Desing of small dams στο κεφάλαιο 3 με τίτλο “Flood Hydrology Studies”. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τους υδρολόγους του γραφείου εγγείων βελτιώσεων του υπουργείου εσωτερικών των Η.Π.Α.

Έπειτα από την μελέτη ενός μεγάλου πλήθους υδρογραφήματων πλημμύρας, οι υδρολόγοι ταξινόμησαν τα υδρογραφήματα ανάλογα με την περιφέρεια και τα τοπογραφικά τους χαρακτηριστικά σε έξι αδιάστατα υδρογραφήματα. Ένα από αυτά ήταν για την περιοχή της Sierra Nevada της California η οποία χαρακτηρίζεται ως ορεινή με ανεπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο και βλάστηση κωνοφόρων δένδρων (Παπαλέξης, 2012)

Η περιοχή της Sierra Nevada απαρτίζονταν από 22 λεκάνες με μέγεθος απορροής που κυμαίνονται από 51.8 km<sup>2</sup> έως 5374 km<sup>2</sup>.

Ο χρόνος υστέρησης του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος υπολογίζεται από την σχέση:

$$t_L = 0.1776C \left[ \frac{LL_{CA}}{\sqrt{S}} \right]^N \quad (h) \quad (3.14)$$

$t_L$ : ο χρόνος υστέρησης του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (h)

$C$ : η σταθερά που λαμβάνεται ίση με 26  $K_n$

$K_n$ : ο συντελεστής Manning που λαμβάνεται ίσος με 0.12

$L$ : το μέγιστο μήκος διαδρομής του κύριου υδατορέματος (km)



$L_{CA}$ : το μήκος του κύριου υδατορέματος από την έξοδο της λεκάνης μέχρι την προβολή του κέντρου βάρους της λεκάνης πάνω στο κύριο ρέμα (km)

$S$ : η κλίση του κυρίου υδατορέματος (m/m)

$N$ : η σταθερά που ισούται με 0.33

Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$t_L = 0.5541 \left[ \frac{LL_{CA}}{\sqrt{S}} \right]^{0.33} \quad (h) \quad (3.15)$$

Η διάρκεια της μοναδιαίας βροχής,  $t_r$ , από την οποία προέρχεται το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα δίνεται από την σχέση:

$$t_r = \frac{t_L}{5.5} \quad (h) \quad (3.16)$$

Οι συντεταγμένες του αδιάστατου μοναδιαίου υδρογραφήματος της Sierra Nevada δίνονται στον Πίνακα 3.2.

Για τον υπολογισμό του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Η τετμημένη του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (χρόνος),  $T_m$ , υπολογίζεται από την σχέση:

$$t_m = \frac{T}{100} \left( t_L + \frac{t_r}{2} \right) \quad (3.17)$$

Όπου:

$t_m$ : ο χρόνος του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (h)

$T$ : λαμβάνεται από τον Πίνακα 3.2

$t_L$ : όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 3.15

$t_r$ : όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 3.16

Η τεταγμένη του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (παροχή),  $Q_m$  που προκύπτει από την απορροϊκή βροχόπτωση 10 mm υπολογίζεται από την σχέση:

$$Q_m = 0.1157 \times \left[ \frac{A \times q}{t_L + \frac{t_r}{2}} \right] \quad (m^3 / s) \quad (3.18)$$

Όπου:

$Q_m$ : η παροχή του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος ( $m^3/s/cm$ )

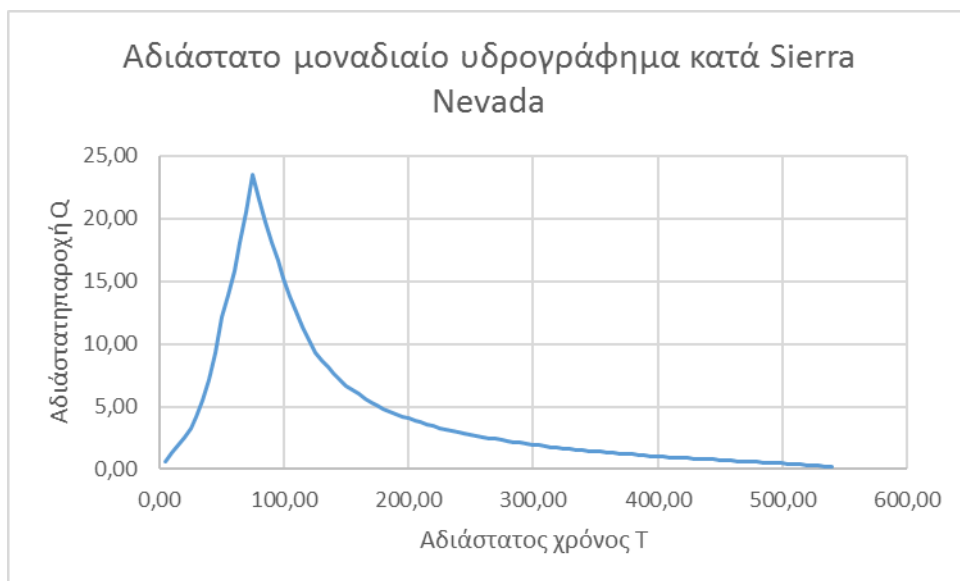
$t_L$ : όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 3.15

$t_r$ : όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 3.16

$q$ : η αδιάστατη παροχή που λαμβάνεται από τον Πίνακα 3-2.

**Πίνακας 3-2: Αδιάστατο ΜΥΓ κατά Sierra Nevada**

$T=t_L + tr/2$ (%)	q	$T=t_L + tr/2$ (%)	q	$T=t_L + tr/2$ (%)	q
5.00	0.65	185.00	4.63	365.00	1.30
10.00	1.30	190.00	4.43	370.00	1.26
15.00	1.95	195.00	4.24	375.00	1.22
20.00	2.60	200.00	4.06	380.00	1.18
25.00	3.25	205.00	3.89	385.00	1.14
30.00	4.23	210.00	3.73	390.00	1.11
35.00	5.51	215.00	3.58	395.00	1.06
40.00	7.17	220.00	3.44	400.00	1.03
45.00	9.34	225.00	3.30	405.00	1.00
50.00	12.17	230.00	3.18	410.00	0.96
55.00	13.88	235.00	3.08	415.00	0.93
60.00	15.83	240.00	2.98	420.00	0.90
65.00	18.05	245.00	2.88	425.00	0.87
70.00	20.59	250.00	2.79	430.00	0.84
75.00	23.48	255.00	2.69	435.00	0.82
80.00	21.54	260.00	2.60	440.00	0.80
85.00	19.77	265.00	2.50	445.00	0.77
90.00	18.13	270.00	2.41	450.00	0.75
95.00	16.63	275.00	2.30	455.00	0.72
100.00	15.26	280.00	2.26	460.00	0.69
105.00	13.83	285.00	2.18	465.00	0.66
110.00	12.53	290.00	2.11	470.00	0.63
115.00	11.36	295.00	2.05	475.00	0.61
120.00	10.29	300.00	1.98	480.00	0.58
125.00	9.33	305.00	1.92	485.00	0.55
130.00	8.73	310.00	1.85	490.00	0.52
135.00	8.17	315.00	1.78	495.00	0.49
140.00	7.65	320.00	1.73	500.00	0.46
145.00	7.15	325.00	1.67	505.00	0.43
150.00	6.69	330.00	1.62	510.00	0.40
155.00	6.33	335.00	1.57	515.00	0.38
160.00	5.99	340.00	1.52	520.00	0.34
165.00	5.67	345.00	1.47	525.00	0.31
170.00	5.36	350.00	1.42	530.00	0.28
175.00	5.07	355.00	1.38	535.00	0.25
180.00	4.85	360.00	1.34	540.00	0.22



**Σχήμα 3-3: Αδιάστατο ΜΥΓ κατά Sierra Nevada**

### 3.3.4 Μέθοδος ισόχρονων καμπυλών

Η μέθοδος των ισόχρονων καμπυλών είναι ένα μοντέλο το οποίο μετασχηματίζει την ενεργό βροχόπτωση σε απορροή, βάση του χρόνου που χρειάζεται για να φτάσει το νερό από κάθε σημείο της λεκάνης στην έξοδο της. Το υδρογράφημα είναι ο μετασχηματισμός του ιστογράμματος της έκτασης της λεκάνης στην οποία εφαρμόζεται. Το ιστογράμμα απεικονίζει την σχέση του χρόνου διαδρομής της απορροής και επιφάνειας. Ο Clark ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την μέθοδο του ιστογράμματος χρόνου – επιφανείας (Clark, 1945)

Με την χρήση των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών και την αυξανόμενη διαθεσιμότητα ψηφιακών μοντέλων εδάφους, η επεξεργασία του ανάγλυφου της λεκάνης γίνεται ευκολότερη και η εφαρμογή αυτής της μεθόδου ακριβέστερη. Σκοπός της μεθόδου είναι η εύρεση του γεωμετρικού τύπου των σημείων που απορρέουν την ίδια χρονική στιγμή. Η λεκάνη απορροής απεικονίζεται σαν ένας κανάβος ψηφίδων ίσης διάστασης, και γνωστού υψομέτρου. Για την εφαρμογή της μεθόδου, αρχικά υπολογίζεται η απόσταση κάθε ψηφίδας από το σημείο εξόδου της λεκάνης. Στην συνέχεια μέσω παραδοχών, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα, υπολογίζεται και η ταχύτητα του νερού σε κάθε ψηφίδα. Με τα δύο αυτά στοιχεία, είναι εφικτός ο υπολογισμός του χρόνου απορροής κάθε ψηφίδας του κανάβου.

Η ζητούμενη απόσταση προκύπτει εύκολα από το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών. Η ταχύτητα του νερού σε κάθε ψηφίδα εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- αν η ψηφίδα αποτελεί μέρος του υδρογραφικού δικτύου.
- την κλίση του εδάφους
- τις χρήσεις γης

Η ταχύτητα ροής διαχωρίζεται σε χερσαία και ποτάμια. Η χερσαία ροή, εξαρτάται από την κλίση καθώς και τις χρήσεις γης της περιοχής οι απεικονίζονται μέσω ενός συντελεστή που προσομοιώνει την τραχύτητα.

Η ποτάμια ροή, λόγω της έλλειψης υδρομετρήσεων συνήθως προκύπτει από παραδοχές. Στην συνέχεια γίνεται η σύνθεση των δύο ταχυτήτων και προκύπτει η τελική ταχύτητα για όλη την περιοχή μελέτης. Η ταχύτητα ροής κάθε κελιού, χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με την απόσταση κάθε φατνίου από την έξοδο της λεκάνης ώστε να υπολογιστεί ο χρόνος απορροής.

### 3.3.5 Μέθοδος IUH κατά Clark

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται όπως και οι υπόλοιπες που αναφέρθηκαν σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις. Το MYG βάση αυτής της μεθόδου υπολογίζεται μέσω ενός μοντέλου βροχής απορροής ανεπτυγμένο σε περιβάλλον ΣΓΠ χρησιμοποιώντας το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Clark (1945). Η μέθοδος αυτή είναι ένας συνδυασμός του διαγράμματος χρόνου επιφανείας με έναν γραμμικό ταμειυτήρα στην έξοδο της λεκάνης και χρειάζεται τον υπολογισμό τριών παραμέτρων για την εφαρμογή της:

1. χρόνος συγκέντρωσης
1. συντελεστής αποθήκευσης – εξασθένισης
2. ιστόγραμμα χρόνου – επιφανείας λεκάνης

Πιο αναλυτικά, ο χρόνος συγκέντρωσης, μπορεί να υπολογιστεί από διάφορες μεθόδους. Στο παρόν στάδιο, επιλέγεται να υπολογιστεί μέσω της μεθόδου της SCS, στην οποία αρχικά γίνεται ο υπολογισμός του χρόνου υστέρησης της λεκάνης, και στην συνέχεια υπολογίζεται ο ζητούμενος χρόνος.

$$t_{lag} = \frac{L^{0.8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{190S^{0.5}} \quad (\text{min}) \quad (3.19)$$

$$t_c = \frac{t_{lag}}{0.6} \quad (\text{min}) \quad (3.20)$$

Όπου:

$t_{lag}$ : χρόνος υστέρησης (h)

L: μέγιστη διαδρομή υδατορεύματος στην λεκάνη (ft)

S: μέση κλίση λεκάνης απορροής (m/m)

CN: μέση τιμή αριθμού καμπύλης της λεκάνης απορροής

Στην συνέχεια μέσω επεξεργασίας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της λεκάνης απορροής υπολογίζεται για κάθε φατνίο το μέγιστο μήκος διαδρομής του έως το σημείο εξόδου της λεκάνης σε μορφή κανάβου με την εντολή σε περιβάλλον ΓΣΠ «flow length». Ο κανάβος αυτός θα αναφέρεται στο εξής ως FlowLengthgrid. Με υπολογισμένα τα δύο παραπάνω στοιχεία, τον χρόνο συγκέντρωσης

της λεκάνης, αλλά και τον κানাβο της απόστασης κάθε κελιού από την έξοδο, υπολογίζεται για κάθε κελί (σε μορφή κανάβου δηλαδή), ο χρόνος απορροής, ή αλλιώς Travel Grid (TtGrid).

Ο κানাβος αυτός δίνεται από την σχέση:

$$TtGrid = \frac{t_c}{MaxofCellTravellengths} * FlowLengthgrid \quad (3.21)$$

Όπου:

$t_c$ : χρόνος συγκέντρωσης λεκάνης απορροής κατά την μέθοδο SCS

MaxofCelltravellengths: Η μέγιστη τιμή του κανάβου FlowLengthgrid (m)

### 3.3.6 Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου υδρολογίας

Η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας (Sutcliffe, 1978) χρησιμοποιεί τοπογραφικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά λεκάνης καθώς και κλίσης του μέγιστου υδατορεύματός της. Η σύνθεση του μοναδιαίου υδρογραφήματος γίνεται για διάρκεια βροχής 1 ώρας. Ο χρόνος ανόδου του υδρογραφήματος υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$t_p = \frac{46.6L^{0.14}}{S_{1085}^{0.38} (1 + URBAN)^{1.99} RSMD^{0.4}} \quad (h) \quad (3.22)$$

Όπου:

L: το μήκος του κύριου υδατορεύματος της λεκάνης (km)

$S_{1085}$ : η κλίση της κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος της λεκάνης σε δύο χαρακτηριστικά σημεία του, σε απόσταση 10% και 85% του ολικού του μήκους από την έξοδο της λεκάνης

URBAN: το ποσοστό της λεκάνης με αστική ανάπτυξη

RSMD: παράμετρος μεγέθους βροχοπτώσεων η οποία για ορεινές και ημιορεινές λεκάνες απορροής ταυτίζεται με το μέγιστο καθαρό επιφανειακό ύψος βροχής διάρκειας 24 h, περιόδου επαναφοράς 5 ετών (mm).

Και διάρκεια πλημμύρας

$$t_b = 2.52t_p \quad (h) \quad (3.23)$$

Η πλημμυρική παροχή αιχμής προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας (όγκος βροχόπτωσης = όγκος πλημμυρογραφήματος) και προκύπτει από την σχέση:

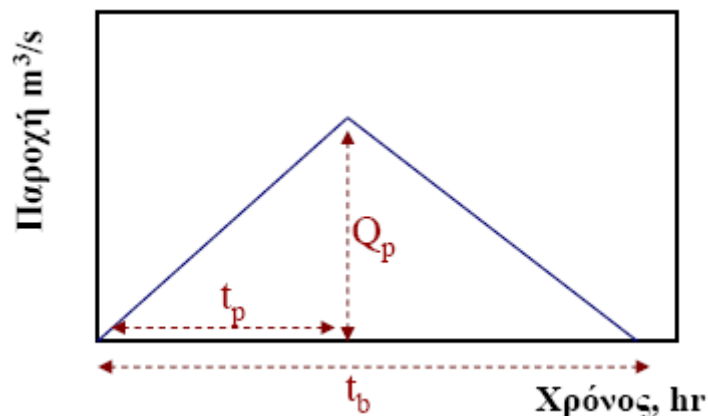
$$Q_p = 2.2 \frac{A}{t_b} \quad (m^3 / s) \quad (3.24)$$

Όπου:

$h_0$ : μοναδιαίο ύψος βροχής, 10 mm

A: έκταση λεκάνης απορροής (km<sup>2</sup>)

$t_b$ : χρόνος ανόδου (h)



Σχήμα 3-4: Τριγωνικό ΜΥΓ κατά την μέθοδο Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας

Το μοναδιαίο υδρογράφημα που προκύπτει, σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, είναι τριγωνικό, ωστόσο αποφασίστηκε να παρουσιαστεί για λόγους πληρότητας της μελέτης.

### 3.4 Εκτίμηση αριθμού καμπύλης CN

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από την Αμερικάνικη Soil Conservation Service (SCS, 1972). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις εξής αρχές:

- 1) Σε ένα αρχικό χρονικό διάστημα  $t_{a0}$  όλη η πραγματική(ακαθάριστη) βροχόπτωση συνολικού ύψους  $h_{a0}$  μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε απώλεια (αρχική απώλεια), χωρίς να δίνει καθόλου περίσσειμα βροχής. Κατά συνέπεια, μετά το χρόνο αυτό, το μέγιστο περίσσειμα βροχής δεν μπορεί να υπερβαίνει το δυνητικό μέγεθος  $y$  ( $=h-h_{a0}$ ) όπου  $h$  το ολικό (ακαθάριστο) ύψος βροχόπτωσης
- 2) Το επιπλέον, πέρα του αρχικού, ύψους απώλειας που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια βροχόπτωση με μεγάλο ολικό ύψος  $h$ , δεν μπορεί να ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή  $S$ , γνωστή και ως δυνητικά μέγιστη κατακράτηση (potential maximum retention).
- 3) Σε κάθε χρονική στιγμή μετά το χρόνο  $t_{a0}$  οι λόγοι του περισσεύματος βροχής  $h_r$  και του επιπλέον (του αρχικού) ύψους απωλειών [ $x=(h-h_r)-h_{a0}$ ] προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ( $y$  και  $S$  αντίστοιχα είναι ίσοι).

$$h/x=y/S \quad (3.25)$$

Με βάση της παραπάνω παραδοχές βρίσκουμε:

$$\begin{aligned} h &= 0 & h &\leq h_{a0} \\ h_r &= \frac{(h-h_{a0})^2}{h-h_{a0}+S} & h &\geq h_{a0} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση 3.26 Δίνει σε κάθε χρονική στιγμή το αθροιστικό, από την αρχή της βροχής, περίσσειμα βροχής  $h_r$  συναρτήσει του ταυτόχρονου ολικού ύψους βροχής  $h$  και των δύο παραμέτρων, των  $h_{a0}$  και  $S$ . Ακόμα παρατηρούμε ότι στην εξίσωση 3.26 δεν συμπεριλαμβάνεται ρητά

ο χρόνος  $t$ , ο οποίος υπεισέρχεται μόνο έμμεσα μέσω της εξάρτησης του  $h$  από τον χρόνο. Οι παραδοχές 2 και 3 της μεθόδου δεν τεκμηριώνονται θεωρητικά και είναι μάλλον αυθαίρετες αλλά, ωστόσο, η μέθοδος είναι εύχρηστη και αρκετά ρεαλιστική. Για περαιτέρω απλοποίηση, υιοθετείται η επιπλέον παραδοχή ότι  $h_{a0}$  είναι  $0.2S$ , η οποία χρησιμοποιείται ως η βέλτιστη προσέγγιση από δεδομένα παρατηρήσεων, οπότε η μέθοδος χρησιμοποιεί τελικώς μόνο μια παράμετρο, την  $S$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι από ερευνητικές εργασίες που έγιναν και στις οποίες διερευνήθηκε η καταλληλότητα της μεθόδου προέκυψε ότι μικρότερο ποσοστό αρχικών απωλειών θα ήταν μάλλον καλύτερη επιλογή (Tsakiris and Agrafiotis, 1988). Με αυτήν την επιπλέον παραδοχή η εξίσωση 3.26 γράφεται:

$$\begin{aligned} h_R &= 0 & h_r < 0.2S \\ h_R &= \frac{(h_r - 0.2S)^2}{(h_r + 0.8S)} & h_r > 0.2S \end{aligned} \quad (3.27)$$

Η εξίσωση 3.27 εφαρμόζεται και για το τελικό ύψος βροχής και για τις ενδιάμεσες τιμές του, και έτσι προκύπτει η χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Το τελικό ύψος απωλειών μπορεί να φτάσει το

$$0.2S + S = 1.2S \quad (3.28)$$

Σε περίπτωση που είναι γνωστό το περίσσειμα  $h_r$  (από μέτρηση της απορροής), τότε από αυτό και το τελικό ολικό ύψος  $h$ , μπορεί να υπολογιστεί η παράμετρος  $S$ . Πράγματι, η εξίσωση 3.27 για  $h_r > 0$  γράφεται

$$0.04S^2 - (0.4h_r + 0.8h_R)S + h_r(h_r - h_R) = 0 \quad (3.29)$$

Και επιλύεται ως προς  $S$  δίνοντας

$$S = 5h_r + 10h_R - 10\sqrt{h_r(h_r + 1.25h_R)} \quad (3.30)$$

Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις απορροής, στην πλειονότητα δηλαδή των λεκανών, χρησιμοποιείται η εμπειρική μεθοδολογία εκτίμησης της παραμέτρου  $S$ . Η παράμετρος  $S$  συνδέεται με μια άλλη χαρακτηριστική παράμετρο, τον αριθμό καμπύλης CN (runoff curve number) με την σχέση:

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right) \quad (3.31)$$

Η παράμετρος CN, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ελλειμμάτων, λαμβάνει τιμές από 0 έως 100 και καθορίζεται από την γεωλογική σύσταση της περιοχής, τις χρήσεις γης αλλά την προηγούμενη κατάσταση υγρασίας.

Η μέθοδος κατατάσσει τα εδάφη σε τέσσερις εδαφικούς τύπους που ορίζονται με τα γράμματα  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ . Τα εδαφικά χαρακτηριστικά καθενός εδαφικού τύπου είναι:

- Τύπος A: Εδάφη με μεγάλη τελική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Βαθιά αμμώδη, βαθιά πηλώδη, συσσωματούμενα ιλυώδη.

- Τύπος Β: Εδάφη με μέτρια τελική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Ρηγά πηλώδη, πηλοαμμώδη.
- Τύπος C: Εδάφη με μικρή τελική διηθητικότητα κι διαπερατότητα. Αργιλλοπηλώδη, ρηγά αμμοπηλώδη, εδάφη με χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανική ουσία, εδάφη πλούσια σε άργιλο.
- Τύπος D: Εδάφη με πολύ μικρή τελική διηθητικότητα και διαπερατότητα. Εδάφη τα οποία διογκώνονται, όταν υγραίνονται, έχουν δηλαδή υψηλή περιεκτικότητα σε μοντοριλονιτική άργιλο και ορισμένα αλατούχα εδάφη.

Στην συνέχεια, ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας:

- Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού), που αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή μικρότερη των 35 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- Τύπος II: Μέσες συνθήκες, που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα), που αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεγαλύτερη των 38 mm (ή μεγαλύτερη των 53 mm, για φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Σε μια περιοχή μελέτης ωστόσο υπάρχουν παραπάνω από ένας τύπος εδάφους και πολλές χρήσεις γης. Αφού λοιπόν υπολογιστεί η τιμή του αριθμού καμπύλης CN για κάθε συνδυασμό τύπου εδάφους και χρήσης που απαντάται στην περιοχή μελέτης, ο αριθμός CN ολόκληρης της περιοχής μελέτης προκύπτει ως σταθμισμένος μέσος όρος με βάρος, την έκταση που καταλαμβάνει κάθε συνδυασμός.

Για τις συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του CN για κάθε υδρολογική ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης. Ο Wanielista (1978) δίνει τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3. Ο πίνακας αυτός προσομοιώνει καλύτερα τις ελληνικές συνθήκες και ισχύει για συνθήκες υγρασίας τύπου II Το περίσσειμα βροχής  $h_R$ , προκύπτει με είσοδο τιμής του ύψους βροχής  $h_r$  και με γνωστό τον αριθμό καμπύλης CN από το Σχήμα 3-5. Για τις συνθήκες υγρασίας των δύο άλλων τύπων, γίνεται αναγωγή μέσω των τύπων:

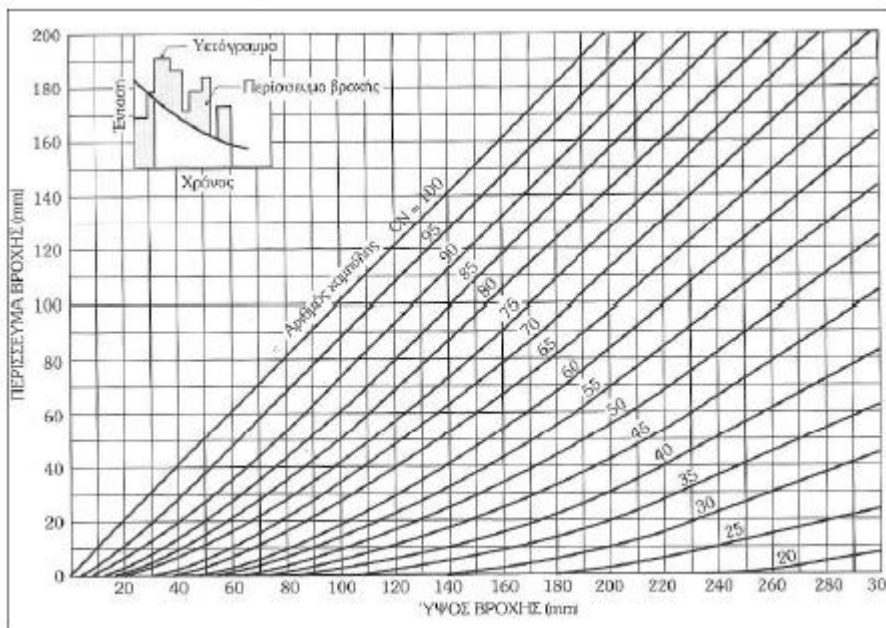
$$CN_I = \frac{4.2 \times CN_{II}}{10 - 0.058 \times CN_{II}} \quad (3.32)$$

$$CN_{III} = \frac{23 \times CN_{II}}{10 + 0.13 \times CN_{II}} \quad (3.33)$$



Πίνακας 3-3: Αριθμός καμπύλης απορροής CN (Wanielista, 1978)

Χρήσης Γης	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
	A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις				
• Χωρίς έργα συντήρησης	72	81	88	91
• Με έργα συντήρησης	62	71	78	81
Ορεινοί βοσκότοποι				
• Κακή κατάσταση	68	79	86	89
• Καλή κατάσταση	39	61	74	80
Λιβαδικές εκτάσεις				
• Καλή κατάσταση	30	58	71	78
Δασικές εκτάσεις				
• Αραιή συστάδα	45	66	77	83
• Πυκνή συστάδα	25	55	70	77
Ελεύθερες εκτάσεις, γήπεδα γκολφ, πάρκα				
• Καλή κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 75% της έκτασης	39	61	74	80
• Μέτρια κατάσταση, κάλυψη με γρασίδι στο 50% της περιοχής	49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές (85% αδιαπέρατες)	89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)	81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές				
Μέσο μέγεθος οικοπέδου				
<500				
Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας				
65	77	85	90	92
40	61	75	83	87
30	57	72	81	86
25	54	70	80	85
20	51	68	79	84
Χώροι πάρκινγκ, στέγες, κ.λ.π.	98	98	98	98
Δρόμοι				
• με οδόστρωμα και αγωγούς όμβριων	98	98	98	98
• χαλικόστρωτοι	76	85	89	91
• χωματόδρομοι	72	82	87	89
Αστικές συνθήκες				
• Γυμνό έδαφος	77	86	91	94
• Κήποι ή θάμνοι	72	81	88	91
• Μεγάλη κάλυψη με πράσινο (>75% της διαπερατής περιοχής)	39	61	74	80
• Μέτρια κάλυψη πρασίνου (50-75% της διαπερατής περιοχής)	49	69	79	84
• Μικρή κάλυψη πρασίνου (<50% της διαπερατής περιοχής)	68	79	86	89
• Άλση	36	60	73	79



Σχήμα 3-5: Υπολογισμός περισσεύματος βροχής με την μέθοδο SCS (Τσακίρης, 1995)

### 3.5 Δείκτες αξιολόγησης αποτελεσμάτων

Για ποσοτικοποίηση των αποκλίσεων και τον έλεγχο προσαρμογής των ΣΜΥΓ υπολογίστηκαν στην παρούσα εργασία, από τα ΜΥΓ που προέκυψαν από παρατηρήσεις, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις δείκτες ως κριτήρια αξιολόγησης της κάθε μεθόδου. Ιδιαίτερα για την περιοχή ενδιαφέροντος της υδρολογίας, συνήθως η αξιολόγηση ενός μοντέλου γίνεται εποπτικά, όσον αφορά τις τιμές της παροχής αιχμής, του συνολικού όγκου απορροής, του χρόνου αιχμής. Με την χρήση δεικτών αξιολόγησης, επιτυγχάνεται αντικειμενικότερη αξιολόγηση καθώς στην διαδικασία του ελέγχου υπεισέρχονται μαθηματικοί τύποι. Τα κριτήρια απόδοσης ορίζονται ως μαθηματικές μετρήσεις του πόσο καλά ένα μοντέλο προσομοίωσης ταιριάζει με τις διαθέσιμες παρατηρήσεις (Beven, 2001). Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, η σύγκριση θα αναφέρεται σε μοναδιαία υδρογραφήματα βέβαια, θεωρώντας ως «αληθές» το ΜΥΓ που προέκυψε από τις ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής απορροής.

Οι δείκτες που υπολογίστηκαν είναι οι εξής:

- Δείκτης Nash – Sutcliffe (Efficiency Index -  $E_f$ )

Ο δείκτης αυτός εξετάζει την ακρίβεια προσομοίωσης των τιμών των χρονοσειρών μεταξύ του παρατηρημένου (στην παρούσα εργασία ως παρατηρημένο θεωρούμε το ΜΥΓ από ταυτόχρονες μετρήσεις βροχής – απορροής), και του προσομοιωμένου μοναδιαίου υδρογραφήματος στο κοινό τους μήκος.

Εάν ο δείκτης λάβει την τιμή ένα 1, υπάρχει πλήρης ταύτιση των δύο χρονοσειρών, επομένως το μοντέλο είναι άκρως επιτυχημένο.

$$E_f = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.34)$$

Εάν ο δείκτης λάβει την τιμή μεταξύ μονάδας (1) και μηδέν (0) τότε το μοντέλο υλοποιεί καλύτερη πρόβλεψη για την πραγματική χρονοσειρά, σε σύγκριση με την μέση τιμή της χρονοσειράς.

Εάν ο δείκτης λάβει την τιμή 0 σημαίνει ότι η πρόβλεψη του μοντέλου είναι το ίδιο αποτελεσματική με την μέση τιμή της χρονοσειράς.

Σε διαφορετική περίπτωση, δηλαδή σε αρνητικές τιμές του δείκτη, η μέση τιμή της παρατηρημένης χρονοσειράς θεωρείται καλύτερο μέσο πρόβλεψης από το εξεταζόμενο μοντέλο.

➤ Δείκτης PEV (percent error in volume)

Ορίζεται ως το επί τοις εκατό (100) σφάλμα του συνολικού όγκου απορροής.

$$PEV = 100 \left| \frac{V_0 - V_M}{V_0} \right| \quad (3.35)$$

Όπου:

V0: Συνολικός όγκος απορροής ΜΥΓ από ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής - απορροής

VM: Συνολικός όγκος απορροής ΣΜΥΓ

➤ Δείκτης PEPF (percent error in peak flow)

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

$$PEPF = 100 \left| \frac{Q_{0(PEAK)} - Q_{M(PEAK)}}{Q_{0(PEAK)}} \right| \quad (3.36)$$

Όπου:

Q0(PEAK): Παροχή αιχμής ΜΥΓ από ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής - απορροής

QM(PEAK): Παροχή αιχμής ΣΜΥΓ

➤ Διαφορά ΔT<sub>PF</sub>

Ορίζεται ως η απόλυτη χρονική διαφορά εκφρασμένη σε λεπτά μεταξύ παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδρογραφήματος



## 4 Επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

---

### 4.1 Εισαγωγή

Για την εφαρμογή των μεθόδων υπολογισμού μοναδιαίων υδρογραφημάτων απαιτούνται γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των λεκάνη απορροής που συμμετέχουν στην μελέτη. Τα χαρακτηριστικά αυτά προέκυψαν μέσω της επεξεργασίας του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, μεγέθους φατνίου 5x5 μέτρα σε περιβάλλον GIS, πιο συγκεκριμένα μέσω του λογισμικού Arc Hydro Tools. Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα βήματα και οι εντολές για την εξαγωγή αλλά και τα χαρακτηριστικά, παρουσιάζοντας εικόνες για μια από τις λεκάνες απορροής, του Βενέτικου.

### 4.2 Λογισμικό Arc Hydro Toolbox

#### 4.2.1 Γενικά

Η επεξεργασία του ΨΜΕ έγινε στο λογισμικό ArcGIS προϊόν της ESRI. Οι περισσότερες από τις εντολές που χρησιμοποιήθηκαν, βρίσκονται σε ένα πρόσθετο πρόγραμμα, το ArcHydro. Το πρόγραμμα αυτό, διαθέτει μια σειρά εντολών κατάλληλες για την επεξεργασία ενός ΨΜΕ όσον αφορά την εξαγωγή υδρολογικών χαρακτηριστικών μια περιοχής μελέτης.

Ο κύριες ενότητες των διαθέσιμων εντολών αναφέρονται συνοπτικά και είναι:

- Προεπεξεργασία εδάφους (Terrain Preprocessing)
- Μορφολογία εδάφους (Terrain Morphology)
- Επεξεργασία Λεκάνης Απορροής (Watershed Processing)
- Εργαλεία Πληροφοριών (Attribute Tools)
- Εργαλεία Δικτύου (Network Tools)
- Δυνατότητες (ApUtilities)
- Εργαλεία (Buttons and Tools)

#### 4.2.2 Προεπεξεργασία ΨΜΕ

- Στο στάδιο αυτό, αρχικά συνενώθηκαν οι πινακίδες των raster για κάθε λεκάνη, ώστε να δημιουργηθεί ένα μωσαϊκό για κάθε λεκάνη απορροής.
- Στην συνέχεια, το raster κάθε λεκάνης διορθώνεται από σφάλματα. Το σημαντικότερο σφάλμα που εντοπίζεται και αφορά την υδρολογία έγκειται στην κακή υψομετρική ακρίβεια του ΨΜΕ,

η οποία κατά την ανάλυση για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου αλλοιώνει την μορφή και τα χαρακτηριστικά του.

Επιπροσθέτως της χαμηλής υψομετρικής ακρίβειας, στο ΨΜΕ δεν έχουν απαλείφει σε πολλές περιπτώσεις τεχνικά έργα για παράδειγμα γέφυρες, αναχώματα οδικών έργων, φράγματα τα οποία εμποδίζουν την ροή του νερού.

Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο, ώστε στα σημεία που υπάρχει ροή, να γίνει διόρθωση του υψομέτρου, μειώνοντας το. Η παραπάνω διαδικασία έγινε μέσω της εντολή DEM reconditioning.

Preprocessing → Dem Reconditioning

- Έπειτα, διορθώθηκαν τα τοπικά βυθίσματα που υπάρχουν στο ΨΜΕ και “εγκλωβίζουν” την ροή του νερού. Με την εντολή fill τα προβλήματα αυτού του είδους διορθώνονται, αυξάνοντας το υψόμετρο των κελιών όπου ώστε να είναι αντίστοιχο με τα περιβάλλοντα τους  
Preprocessing → Fill Sinks

#### 4.2.3 Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου

- Ακολούθησε ο υπολογισμός του κανάβου διεύθυνσης ροής, το οποίο προσδιορίζει την κατεύθυνση που θα ακολουθήσει η απορροή κάθε κελιού σε ένα από τα οκτώ γειτονικά του μέσω του υπολογισμού της μεγαλύτερης κλίσης

Terrain Preprocessing → Flow Direction

- Υπολογισμός κανάβου συγκεντρωτικής ροής

Το αποτέλεσμα αυτού του σταδίου είναι ένας κανάβος για κάθε κελί του οποίου αναφέρονται πόσα ανάντη κελία απορρέουν σε αυτό.

Terrain Preprocessing → Flow Accumulation

- Προσδιορισμός υδρογραφικού δικτύου

Σε αυτό το βήμα, ο χρήστης του λογισμικού βάση του προηγούμενο κανάβου που έχει υπολογιστεί, επιλέγει ένα κατώφλι αριθμού κελιών που απορρέουν σε ένα φατνίο (ή έκταση) πάνω από την οποία θεωρεί το κελί υδρογραφικό δίκτυο. Για τον ακριβή προσδιορισμό του υδρογραφικού δικτύου, ώστε να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, έγιναν αρκετές δοκιμές για την επιλογή του κατωφλιού αυτού, τα αποτελέσματα κάθε μιας συγκρίθηκαν με το ψηφιοποιημένο αρχείο για τα υδατορεύματα που ήταν διαθέσιμο, όπως επίσης έγινε και οπτικός έλεγχος των αποτελεσμάτων στους ορθοφωτοχάρτες LSO της ΕΚΧΑ.

Preprocessing → Stream Definition

- Διαχωρισμός υδατορευμάτων

Σε αυτό το στάδιο έγινε η δημιουργία ενός πλέγματος συνδέσεων μεταξύ δύο κόμβων και υδατορευμάτων.

Terrain Preprocessing → Stream Segmentation

- Διανυσματική απεικόνιση υδατορευμάτων  
Ακολούθησε η διανυσματική απεικόνιση του υδρογραφικού δικτύου.  
Terrain Preprocessing → Drainage Line Processing

#### 4.2.4 Χαρακτηριστικά λεκάνης απορροής

- Προσδιορισμός λεκάνης απορροής  
Κατά την συνένωση των πινακίδων raster δημιουργήθηκε ένα μωσαϊκό το οποίο περιλαμβάνει μια ευρύτερη από την λεκάνη απορροή περιοχή. Μέσω αυτού του βήματος, αναγνωρίζεται η λεκάνη απορροής για το σημείο εξόδου (εκροής) που ορίζει ο χρήστης του λογισμικού. Σαν σημεία εξόδου επιλέχθηκαν τα σημεία στα οποία υπάρχουν εγκατεστημένοι σταθμηγράφοι.
- Διανυσματική απεικόνιση λεκανών απορροής  
Η λεκάνη που προσδιορίζεται από το προηγούμενο βήμα, μετατρέπεται σε διανυσματική μορφή.

Τα παραπάνω βήματα έγιναν χρησιμοποιώντας ως raster το τροποποιημένο, τα υψόμετρα του οποίου έχουν τροποποιηθεί σε κάποια σημεία, (για να μην παρεμποδίζεται η ροή του νερού) δηλαδή δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

- Προσδιορισμός μέσης κλίσης λεκάνης απορροής  
Το στάδιο αυτό έγινε με το αρχικό raster, διορθωμένο μόνο από τα τοπικά βυθίσματα.
- Προσδιορισμός μέγιστου μήκους υδάτινης διαδρομής

Watershed Processing → Longest Flow Path

- Προσδιορισμός κέντρου βάρους λεκάνης απορροής

Watershed Processing → Drainage Area Centroid

### 4.3 Μορφομετρικά χαρακτηριστικά

- Έκταση λεκάνης απορροής

Βάση της έκτασης τους, οι λεκάνες κατατάσσονται σε μικρές ( $A < 250 \text{ km}^2$ ), μεσαίες ( $250 \text{ km}^2 < A < 2500 \text{ km}^2$ ) και μεγάλες ( $A > 2500 \text{ km}^2$ ). Οι λεκάνες απορροής της παρούσας μελέτης περιλαμβάνουν και τους τρεις τύπους (Πίνακας 4-1).

**Πίνακας 4-1: Έκταση λεκανών απορροής**

	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Έκταση A(km <sup>2</sup> )	2778.48	134.44	850.86
Κατάταξη	Μεγάλη	Μικρή	Μεσαία

- Σχήμα λεκάνης απορροής-Δείκτες

Ο δείκτης κυκλικότητας ορίζεται ως ο λόγος επιφάνειας της λεκάνης προς την επιφάνεια κύκλου με περίμετρο ίδια της λεκάνης.

Ο δείκτης συμπαγούς ορίζεται ο λόγος της περιμέτρου της λεκάνης προς την περίμετρο κύκλου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης.

Ο δείκτης επιμήκυνσης ορίζεται ως ο λόγος της πλευράς ενός τετραγώνου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης, προς ένα το μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής.

Οι τιμές των δεικτών μπορούν να δώσουν μια εκτίμηση για το σχήμα των λεκανών απορροής γνωρίζοντας ότι οι θεωρητική τιμή τους ίση με την μονάδα αναφέρεται σε μια κυκλική λεκάνη απορροής. (Μαμάσης, 2010)

Η κυκλικού σχήματος λεκάνη θεωρείται ότι παράγει απότομα υδρογραφήματα. Στον Πίνακα 4-2 βάση των τιμών των δεικτών δίνετε μια εικόνα για το κατά πόσο το σχήμα των λεκανών πλησιάζει το κυκλικό.

**Πίνακας 4-2: Τιμές δεικτών σχήματος λεκανών απορροής**

Δείκτες	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Κυκλικότητας $R_c$	0.23	0.26	0.32
Συμπαγούς $C_c$	2.08	1.96	1.77
Επιμήκυνσης $R_e$	0.95	1.28	0.99

➤ Χαρακτηριστικά υψόμετρα λεκανών απορροής

Στον Πίνακα 4-3 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά υψόμετρα των λεκανών απορροής.

**Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά υψόμετρα λεκανών απορροής**

	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Υψόμετρο στην έξοδο της λεκάνης απορροής (m)	92	197	436
Μέγιστο υψόμετρο λεκάνης απορροής (m)	1304	1423	1264
Μέσο υψόμετρο λεκάνης απορροής (m)	559	929	1017

➤ Μέση κλίση λεκάνης απορροής

Η μέση κλίση των λεκανών απορροής που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-4, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό σημαντικών παραμέτρων στην υδρολογία, όπως ο χρόνος συγκέντρωσης.

**Πίνακας 4-4: Μέσες κλίσεις λεκανών απορροής**

	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Μέση κλίση λεκάνης απορροής (%)	31.8	53.9	34.8

➤ Ταξινόμηση υδρογραφικού δικτύου

Η ταξινόμηση του υδρογραφικού δικτύου έγινε με την μέθοδο Strahler. Η εφαρμογή της γίνεται ως εξής:



Το υδατόρευμα που δεν δέχεται την απορροή κανενός άλλου, λογίζεται σαν υδατόρευμα τάξης 1. Η συμβολή δύο υδατορευμάτων ίδιας τάξης οδηγεί στην δημιουργία υδατορεύματος ανώτερης κατά 1 τάξης. Η τάξη ενός υδατορεύματος δεν μεταβάλλεται αν συμβάλει σε αυτό υδατόρευμα μικρότερης τάξης.

➤ Μήκος κύριου υδατορεύματος και λεκάνης

Το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής καθώς και το μήκος λεκάνης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4-5**.

**Πίνακας 4-5: Χαρακτηριστικά μήκη λεκανών απορροής**

	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Μήκος λεκάνης (km)	101.682	13.4	40.14
Μήκος κύριου υδατορεύματος L (km)	138.998	21.57	85.83

➤ Μέση κλίση υδατορεύματος

Η μέση κλίση του κυρίου υδατορεύματος κάθε λεκάνης παρουσιάζεται στον **Πίνακα 4-6**

**Πίνακας 4-6: Μέση κλίση κύριου υδατορεύματος λεκανών απορροής**

	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Μέση κλίση κύριου υδατορεύματος (m/km)	5.79	38.32	5.67

➤ Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου

Η πυκνότητα του υδρογραφικού δικτύου για κάθε λεκάνη απορροής παρουσιάζεται στον **Πίνακα 4-7**.

**Πίνακας 4-7: Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου λεκανών απορροής**

	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου (1/km)	4.77	3.87	2.74

➤ Μέση απόσταση από τον υδροκρίτη έως το υδατόρευμα

Η μέση απόσταση των υδατορευμάτων από τον υδροκρίτη για κάθε λεκάνη παρουσιάζεται στον **Πίνακα 4-8**.

**Πίνακας 4-8: Μέση απόσταση υδατορευμάτων απο τον υδροκρίτη**

	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Μέση απόσταση από τον υδροκρίτη μέχρι υδατόρευμα (km)	0.21	0.26	0.36

➤ Μέση διαδρομή σταγόνας σε συνθήκες επίγειας ροής

Στον Πίνακα 4-9 παρουσιάζεται η μέση διαδρομή σταγόνας μέχρι το υδρογραφικό δίκτυο για κάθε λεκάνη απορροής. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη τόσο πιο γρήγορη είναι η απορροή της λεκάνης.

**Πίνακας 4-9: Μέση διαδρομή σταγόνας μέχρι το υδρογραφικό δίκτυο**

	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Μέση διαδρομή σταγόνας μέχρι υδρογραφικό δίκτυο (km)	0.10	0.13	0.18

Συνολικά, τα χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-10.

**Πίνακας 4-10: Χαρακτηριστικά λεκανών απορροής**

	Αλή Εφέντη	Πύλη	Βενέτικος
Έκταση A(km <sup>2</sup> )	2778.48	134.44	850.86
Μήκος κύριου υδατορεύματος L (km)	138.998	21.57	85.83
Μήκος από την έξοδο μέχρι προβολή κ.β λεκάνης Lc (km)	62.9	10.2	33.1
Υψόμετρο στην έξοδο της λεκάνης απορροής (m)	91.72	197	436
Μέγιστο υψόμετρο λεκάνης απορροής	1304	1423	1264
Μέσο υψόμετρο λεκάνης απορροής	559	929	1017
Υψόμετρο υδατορεύματος στο 10% του μήκους του (m)	93.9	234	498
Υψόμετρο υδατορεύματος στο 85% του μήκους του (m)	697.35	854	863
Μέση κλίση κύριου υδατορεύματος (m/km)	5.79	38.32	5.67
RMSD (mm)	85	85	85
URBAN (%)	5	5	5
Μέση κλίση λεκάνης απορροής (%)	31.8	53.9	34.8
Μήκος λεκάνης (km)	101.682	13.4	40.14
Συνολικό μήκος υδατορευμάτων (km)	662.916	83.5	235.44
Περίμετρος λεκάνης απορροής (km)	388.705	80.55	183.13
Κατώφλι υδρογραφικού δικτύου (km <sup>2</sup> )	1.00	1.00	1.20
Δείκτες			
Κυκλικότητας R <sub>c</sub>	0.23	0.26	0.32
Συμπαγούς C <sub>c</sub>	2.08	1.96	1.77
Επιμήκυνσης R <sub>e</sub>	0.95	1.28	0.99
Πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου (1/km)	4.77	3.87	2.74
Μέση απόσταση από τον υδροκρίτη μέχρι υδατόρευμα (km)	0.21	0.26	0.36
Μέση διαδρομή σταγόνας μέχρι υδρογραφικό δίκτυο (km)	0.10	0.13	0.18

## 4.4 Περιγραφή μεθόδου ΣΜΥΓ κατά Clark σε περιβάλλον GIS

### 4.4.1 Γενικά

Το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Clark λαμβάνει υπόψη του το περιστατικό μοναδιαίας βροχής καθαρού πλεονάσματος βροχής 10 mm ομοιόμορφα κατανεμημένο πάνω στην λεκάνη απορροής. Η τεχνική απαιτεί τον υπολογισμό τριών παραμέτρων: α) τον χρόνο συγκέντρωσης  $T_c$ , β) τον συντελεστή αποθήκευσης-εξασθένισης, γ) το ιστόγραμμα χρόνου επιφανείας της λεκάνης, για τον υπολογισμό της απορροής (Anastasiadis et al, 2013).

### 4.4.2 Υπολογισμός αριθμού καμπύλης CN

Ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης αποφασίστηκε να υπολογιστεί με την μέθοδο της SCS-lag, η οποία προϋποθέτει τον προσδιορισμό του αριθμού καμπύλης CN, ο υπολογισμός του οποίου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία για να καθοριστεί με ακρίβεια. Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ο υπολογισμός του αριθμού καμπύλης έγινε μέσω της χρήσης λογισμικού ΣΓΠ, με χρήση εδαφολογικών δεδομένων και χρήσεων γης στις περιοχές μελέτης. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 της εργασίας. Ακολουθεί μια περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του.

Για κάθε λεκάνη απορροής, με την χρήση του διαθέσιμου ψηφιακού εδαφολογικού χάρτη έγινε η κατάταξη των εδαφών σε τέσσερις κατηγορίες, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους, βάση της μεθόδου που αναπτύχθηκε από το USDA Natural Resources Conservation Service, ή SCS. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε συνένωση των περιοχών με τύπο εδάφους της ίδιας κατηγορίας.

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες του Corine Land Cover του 2012 που επίσης παρουσιάστηκαν στον Κεφάλαιο 2. Από αυτούς τους χάρτες αναγνωρίστηκαν οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης. Οι περιοχές με την ίδια χρήση γης συνενώθηκαν.

Επόμενο βήμα ήταν η επίθεση του χάρτη των ομαδοποιημένων χρήσεων γης, στον χάρτη με τα εδάφη κατηγοριοποιημένα στις τέσσερις κατηγορίες μέσω της εντολής intersect του λογισμικού ArcGIS. Πιο συγκεκριμένα,

Arctoolbox → Analysis Tools → Overlay → Intersect

Επικαλύπτοντας τα δύο αυτά επίπεδα υπολογίζεται η έκταση που καταλαμβάνει ο κάθε συνδυασμός κατηγορίας εδάφους και χρήσης γης. Μέσω του Πίνακα 3-3 κάθε συνδυασμός λαμβάνει και την τιμή του αριθμού καμπύλης απορροής CN. Η τελική τιμή του CN για την λεκάνη απορροής προκύπτει ως σταθμισμένος μέσος όρος, ανάλογα με την έκταση που καταλαμβάνει κάθε συνδυασμός.

$$CN = \frac{\sum_{n=i}^{n=j} CN_i A_i}{\sum_{n=i}^{n=j} A_i} \quad (4.1)$$

#### 4.4.3 Υπολογισμός χρόνου συγκέντρωσης

Ο χρόνος συγκέντρωσης κάθε λεκάνης θα υπολογιστεί με την μέθοδο SCS-lag.

Αρχικά υπολογίζεται ο χρόνος υστέρησης από τον τύπο:

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{190S^{0.5}} \quad (\text{min}) \quad (4.2)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο χρόνος συγκέντρωσης:

$$T_c = \frac{T_{lag}}{0.6} \quad (h) \quad (4.3)$$

Όπου:

L: μήκος μέγιστης υδάτινης διαδρομής (feet)

S: μέση κλίση λεκάνης απορροής (m/m)

CN: μέσος όρος της λεκάνης απορροής

S: μέση κλίση και το μήκος της μέγιστης υδάτινης διαδρομής έχουν προκύψει κατά την επεξεργασία του ΨΜΕ.

#### 4.4.4 Κάναβος χρόνου απορροής

Για την υλοποίηση αυτού του σταδίου, αρχικά γίνεται μια επεξεργασία του διαθέσιμου ΨΜΕ. Το ΨΜΕ διορθώνεται από τις κοιλότητες που υπάρχουν σε αυτό και στην συνέχεια υπολογίζεται ο κάναβος διεύθυνσης ροής. Ο κάναβος διεύθυνσης ροής, χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο κάναβος μήκους ροής των φατνίων μέχρι την έξοδο της λεκάνης. Η παραγωγή του κανάβου πραγματοποιείται με την εντολή Flowlength. Η μέγιστη τιμή αυτού του κανάβου αναφέρεται στο υδρολογικά πιο απομακρυσμένο φατνίο.

Στην συνέχεια μέσω του εργαλείου raster calculator που διαθέτει το λογισμικό ArcGIS υπολογίζεται ο κάναβος χρόνου μεταφοράς του συνόλου των φατνίων της λεκάνης ο οποίος αναφέρεται ως TtGrid.

$$TtGrid = \frac{T_c}{\text{MaxofCelltravellengths}} \text{FlowLenghtgrid} \quad (4.4)$$

Όπου:

MaxofCelltravellengths: η μέγιστη τιμή του κανάβου Flowlength

Ο παραγόμενος κάναβος περιέχει τον χρόνο απορροής κάθε κελιού. Στην συνέχεια, τα κελία της περιοχής μελέτης ταξινομούνται σε κλάσεις ανά μια ώρα και δημιουργείται το ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας. Ως αποτέλεσμα δίνεται πόσα κελιά απορρέουν ανά μια ώρα. Στην συνέχεια, ο αριθμός των κελιών μετατρέπεται σε απορροή βάση της σχέσης:

$$U = N_{cells} \text{ hA} / 3600 \quad (4.5)$$

Όπου:

U: τετμημένη ΜΥΓ ανά χρονικό βήμα ( $m^3$ )

N: αριθμός κελιών που απορρέουν σε κάθε χρονικό διάστημα

A: εμβαδό φατνίου, στην συγκεκριμένη μελέτη  $25 m^2$

Το ΜΥΓ που προκύπτει από την μέθοδο αυτή εμφανίζει, ιδιαίτερα στον κλάδο καθόδου μια κυματοειδή μορφή ως απόρροια των σφαλμάτων του ΨΜΕ. Μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης, τα διαστήματα που παρατηρείται αυτό το σφάλμα, απαλείφονται.

## **4.5 Περιγραφή μεθόδου ισόχρονων καμπυλών σε λογισμικό GIS**

### **4.5.1 Γενικά**

Το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σε αυτό το σημείο, θα επιχειρηθεί να αναφερθούν σε συντομία τα βήματα υλοποίησης της μεθόδου. Μια πιο εκτεταμένη περιγραφή και πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή της μεθόδου έχει γίνει στην μεταπτυχιακή εργασία της Καββαδά Όλγας (Καββαδά, 2012).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε λεκάνη απορροής είναι:

- ΨΜΕ διαστάσεων φατνίων  $5 \times 5 m$ .
- Χάρτες χρήσεων γης για τον υπολογισμό του συντελεστή k
- Ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο για επαλήθευση των υδατορευμάτων που προκύπτουν από την εκτέλεση εντολών σε λογισμικό ΣΓΠ, αλλά και διόρθωση του ΨΜΕ.

Αρχικά, γίνεται μια επεξεργασία του ΨΜΕ για την διόρθωση του και την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου.

Στην συνέχεια δημιουργείται ένας κανάβος ο οποίος περιέχει για κάθε φατνίο του ανήκει στο υδρογραφικό δίκτυο, την ταχύτητα του (ποτάμια ταχύτητα), ενώ τα υπόλοιπα έχουν μηδενική τιμή.

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός κανάβου ταχύτητας χερσαίας ροής, της ταχύτητας που έχει το νερό όταν βρίσκεται εκτός υδρογραφικού δικτύου.

Οι δύο αυτές ταχύτητες στο συνενώνονται. Το τελευταίο βήμα είναι ο υπολογισμός του χρόνου απορροής κάθε κελιού.

### **4.5.2 Υπολογισμός ταχύτητας ροή υδρογραφικού δικτύου**

- Διόρθωση ΨΜΕ

Το πρώτο βήμα εφαρμογής της μεθόδου ήταν η διόρθωση του ΨΜΕ, από τεχνικά έργα που λειτουργούν ως ανάχωμα και εμποδίζουν την κίνηση του νερού, όπως τάφροι, γέφυρες και άλλα. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο, ώστε να ελαττωθούν τα υψόμετρα των σημείων από τα οποία περνάει, να σχηματιστεί δηλαδή η ορθή βαθιά γραμμή.

- Εξαγωγή υδρογραφικού δικτύου, υπολογισμός ταχυτήτων υδρογραφικού δικτύου

Στην συνέχεια δημιουργούνται βάση του διορθωμένου ΨΜΕ οι εξής κানাβοί για την εξαγωγή του υδρογραφικού δικτύου που θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση μας.

Δημιουργούνται λοιπόν οι:

1. Κανάβος διεύθυνσης ροής (εντολή: flow direction)
2. Κανάβος συγκεντρωτικής ροής (εντολή flow accumulation)
3. Καθορισμός υδρογραφικού δικτύου

Εντολή stream definition (επιλογή κατωφλιού συσσώρευσης ροής για να θεωρηθεί υδρογραφικό δίκτυο ένα κελί), επαλήθευση παραχθέντος δικτύου.

4. Διαχωρισμός υδατορευμάτων (stream definition), Διανυσματική απεικόνιση υδρογραφικού δικτύου (drainage line processing)

Με αυτές τις εντολές το υδρογραφικό δίκτυο παρουσιάζεται σε διανυσματική μορφή.

4. Κατάταξη υδρογραφικού δικτύου με την μέθοδο Strahler
5. Δημιουργία raster αρχείου για κάθε τάξη υδρογραφικού δικτύου ξεχωριστά
6. Σε κάθε τάξη υδρογραφικού δικτύου δίνεται μια ταχύτητα ροής. Η ταχύτητα ροής, λόγω έλλειψης δεδομένων, δίνεται προσεγγιστικά και με την παραδοχή ότι η ταχύτητα αυξάνεται όσο μεγαλώνει η τάξη του υδρογραφικού δικτύου. Οι ταχύτητες που δόθηκαν κυμαίνονται από 0.8 m/s έως 1.4 m/s.
7. Δημιουργία ενιαίου αρχείου raster με τις ταχύτητες των ρεμάτων.

#### 4.5.3 Υπολογισμός κανάβου ταχύτητας χερσαίας ροής

1. Διόρθωση αρχικού ΨΜΕ από κοιλότητες μέσω της εντολής fill
2. Υπολογισμός κανάβου κλίσεων λεκάνης απορροής
3. Υπολογισμός συντελεστή  $k$  που προσομοιώνει τον συντελεστή τραχύτητας
4. Η ταχύτητα χερσαίας ροής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V = K\sqrt{S} \quad (4.6)$$

Όπου:

$V$ : ταχύτητα χερσαίας ροής (m/s)

$k$ : συντελεστής που προσομοιώνει την τραχύτητα του εδάφους

$S$ : κλίση εδάφους (από κানাβο κλίσεων) (m/m)

#### 4.5.4 Υπολογισμός Ισόχρονων καμπυλών

1. Γίνεται η συνένωση των δύο κανάβων ταχυτήτων, υδρογραφικού δικτύου και χερσαίας ροής, σε έναν. Στα φατνία που οι δύο κানাβοί επικαλύπτονται, η ταχύτητα του φατνίου θεωρείται η μεγαλύτερη των δύο.
2. Υπολογισμός κανάβου συγκεντρωτικών χρόνων ροής. Μέσω της εντολής flow length, η οποία υπολογίζει την απόσταση κάθε φατνίου από την έξοδο της λεκάνης απορροής, αν εισαχθεί ως βάρος σε αυτόν τον υπολογισμό ο κানাβος του

αντίστροφου της ταχύτητας των φατνίων της λεκάνης, η εντολή δίνει ως αποτέλεσμα τον χρόνο ροής κάθε κελιού μέχρι της έξοδο της λεκάνης.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι οι ισόχρονες λεκάνες, ένας πίνακας δηλαδή, που αναφέρει πόσα κελιά απορρέουν σε κάθε χρονικό βήμα που επιλέγεται. Ζητούμενο στην μελέτη ήταν η εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος διάρκειας μιας ώρας. Επομένως το χρονικό βήμα τέθηκε μια ώρα.

3. Ο υπολογισμός της παροχής ανά ώρα έγινε με γνωστή την παραδοχή του μοναδιαίου (καθαρή βροχή 10 mm) και της διάστασης των φατνίων (5x5 m), από την εξίσωση 4.5.





## 5 Αποτελέσματα

---

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούν οι τιμές των παραμέτρων και τα αποτελέσματα των μεθόδων υπολογισμού μοναδιαίων υδρογραφήματων 1 h. Ακόμα, τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με το μοναδιαίο υδρογράφημα που δημιουργήθηκε από ταυτόχρονες μετρήσεις βροχής – απορροής.

### 5.2 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη

#### 5.2.1 Μέθοδος Snyder

Η εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος έγινε με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS. Τα δεδομένα εισόδου αναφέρονται στον Πίνακα 5-1.

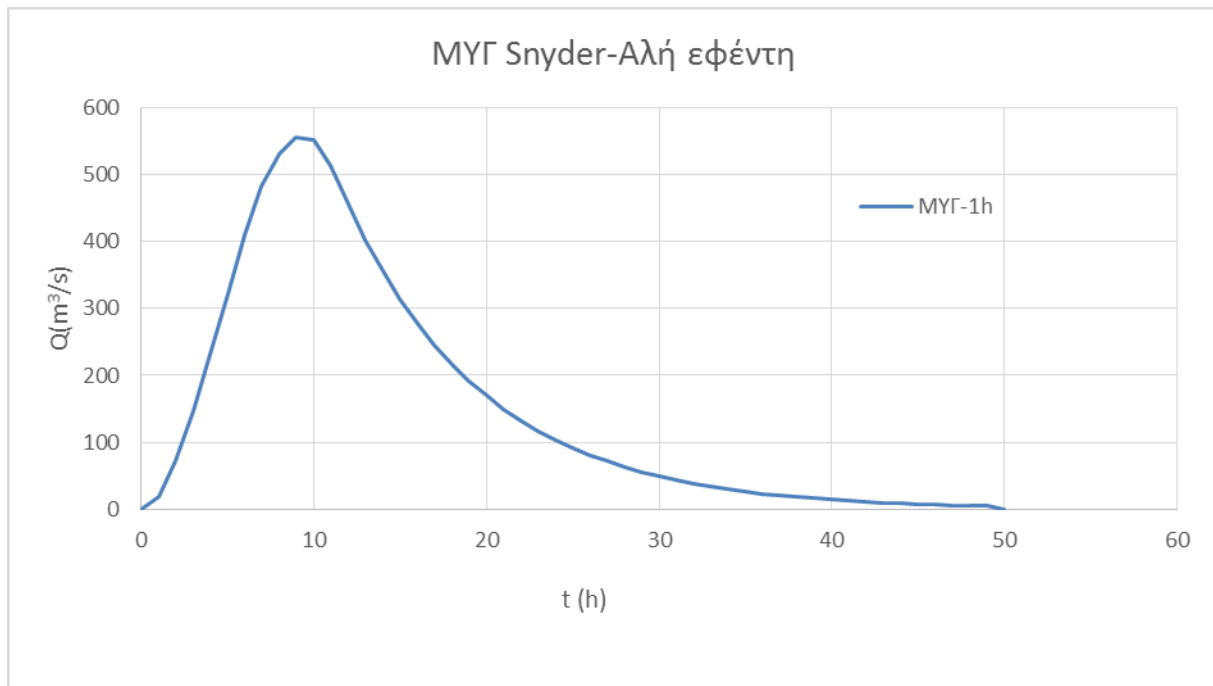
**Πίνακας 5-1: Τιμές παραμέτρων**

L (km)	139.00
Lc (km)	62.90
Ct	0.80
Cq	0.64
tp (hr)	9.13

Η τιμή του συντελεστή  $C_q$  λήφθηκε η ίδια από διδακτορική διατριβή που πραγματοποιήθηκε για την ίδια λεκάνη (Μπαλτάς, 1996)

Για την τιμή του συντελεστή  $C_t$  έγινε μια συνήθης παραδοχή

Το αποτέλεσμα της μεθόδου δίνει πολύ υψηλές τιμές παροχής αιχμής, 554.80 m<sup>3</sup>/s, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1.



**Σχήμα 5-1: ΜΥΓ κατά Snyder**

### 5.2.2 Μέθοδος SCS

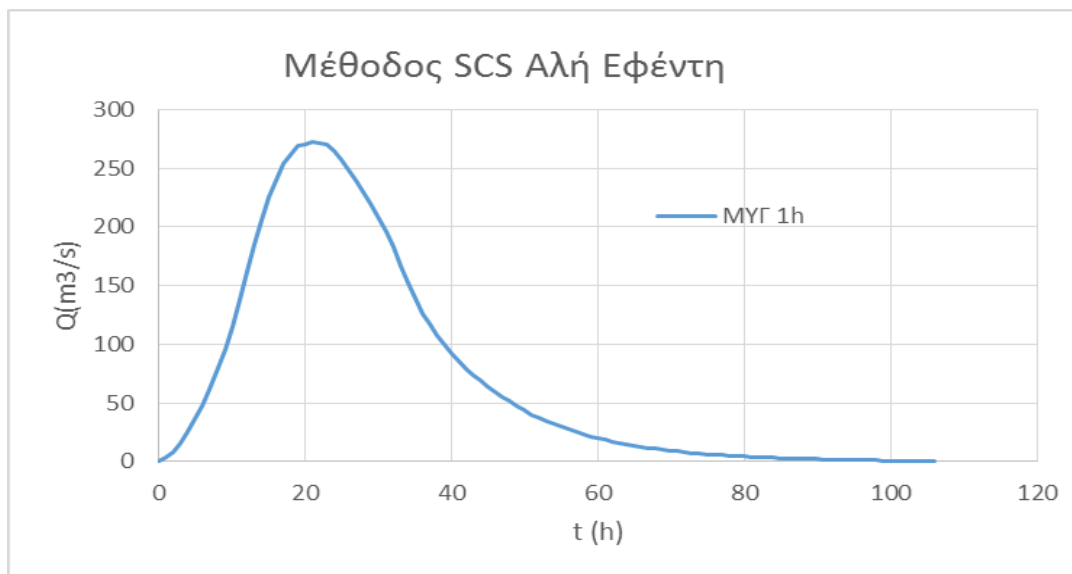
Η εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος έγινε με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS.

Τα δεδομένα εισόδου αναφέρονται στον Πίνακα 5-2.

Η εφαρμογή της μεθόδου δίνει όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-2 ΣΜΥΓ με αιχμή 272.00  $\text{m}^3/\text{s}$ .

**Πίνακας 5-2: Στοιχεία εισόδου**

$t_p$ (h)	21.22
$t_R$ (h)	1
$t_L$ (min)	1242.92
$C_t$	1.8
$L$ (km)	139
$L_c$ (km)	62.90



**Σχήμα 5-2: ΜΥΓ κατά SCS**

### 5.2.3 Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας

Η χρήση της μεθόδου του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας δίνει ως αποτέλεσμα ένα τριγωνικό ΜΥΓ. Αποφασίσθηκε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της, χωρίς ωστόσο να γίνει σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3.

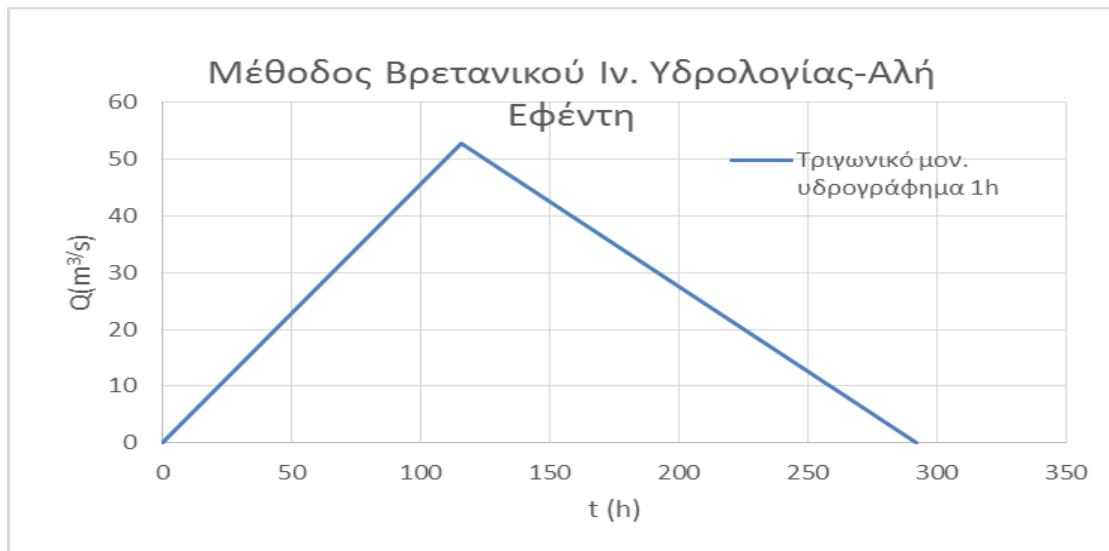
**Πίνακας 5-3: Τιμές παραμέτρου μεθόδου Βρ. Ιν. Υδρολογίας**

L (km)	139.00
S1085 (m/km)	5.79
URBAN (%)	5.00
RSMD (mm)	85
$t_p$ (hr)	116.06
$t_b$ (hr)	292.48
$Q_p$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	52.78

Η παράμετρο URBAN αναφέρεται στο ποσοστό των αστικών εκτάσεων της περιοχής μελέτης

Η παράμετρο RSMD αναφέρεται στο μέγιστο καθαρό επιφανειακό ύψος βροχής διάρκειας 24 h, και έγινε η παραδοχή των 85 mm.

Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι ένα ΣΜΥΓ με μεγάλο χρόνο βάσης και μικρή παροχή αιχμής όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-3.



Σχήμα 5-3: Τριγωνικό ΜΥΓ κατά την μέθοδο Βρετανικού Ιν. Υδρολογίας

#### 5.2.4 Μέθοδος Ισόχρονων καμπυλών

Για την μέθοδο των Ισόχρονων καμπυλών έγιναν οι εξής παραδοχές για τις ταχύτητες του υδρογραφικού δικτύου, ανάλογα με την τάξη στην οποία ανήκει κάθε τμήμα του.

Το κατώφλι έκτασης για την αναγνώριση του υδρογραφικού δικτύου προέκυψε 1.2 km<sup>2</sup>

Η μέση ταχύτητα χειρσαίας ροής, η μέση ταχύτητα ροής της λεκάνης καθώς και η μέση τιμή του συντελεστή k πολλαπλασιασμένη επί 100 αναφέρονται στον Πίνακα 5-4. Η μέθοδος προέκυψε από ανάλυση του ΨΜΕ το οποίο περιέχει σφάλματα. Για να διορθωθούν, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση για την ομαλοποίηση του καθοδικού κλάδου.

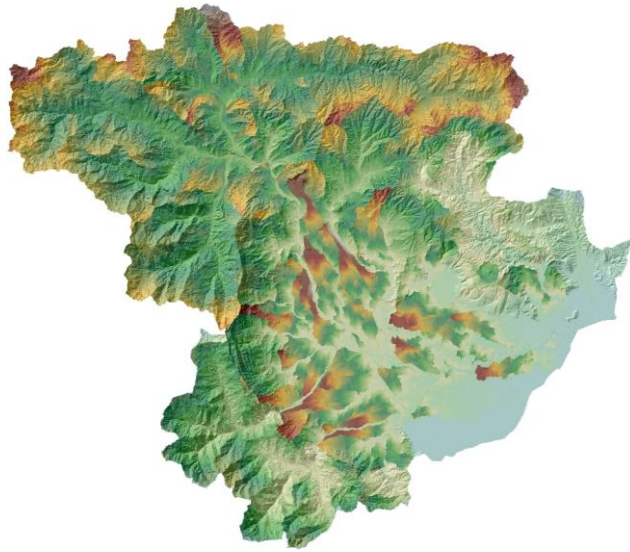
Πίνακας 5-4: Παράμετροι μεθόδου Ισόχρονων καμπυλών, λεκάνης Αλή Εφέντη

	κατώφλι υδρογραφικού δικτύου (km <sup>2</sup> )	Ταχύτητες τάξεων υδρ. Δικτύου (m/s)					Μεση ταχύτητας χειρσαίας ροής (m/s)	Μέση ταχύτητα ροής λεκάνης (m/s)	Μέση τιμή συντελεστ ή k*100
		1	2	3	4	5			
Τιμές	1.2	0.8	1	1.2	1.4	-	0.22	0.23	55.46

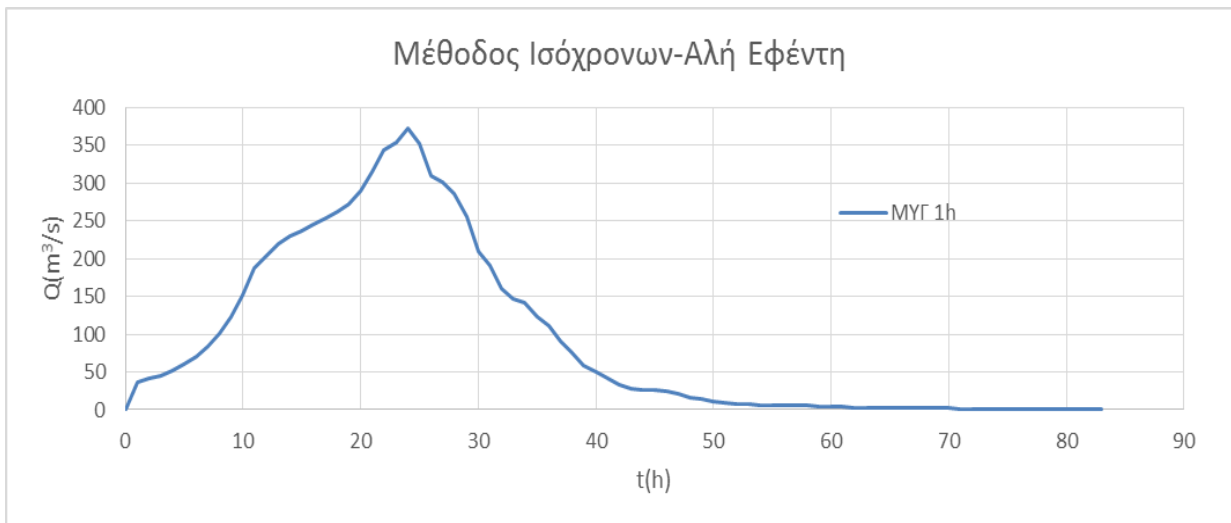
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-4 όπου με καφέ χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές με τον μεγαλύτερο χρόνο απορροής. Στο

Σχήμα 5-5 απεικονίζεται το ΜΥΓ.

Η τιμή παροχής αιχμής υπολογίστηκε 371.92 m<sup>3</sup>/s.



Σχήμα 5-4: Ισόχρονες καμπύλες Αλή Εφέντη



Σχήμα 5-5: MYΓ κατά την μέθοδο των Ισόχρονων καμπυλών στην λεκάνη Αλή Εφέντη

### 5.2.5 Μέθοδος IUH Clark

Στον Πίνακα 5-5 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν.

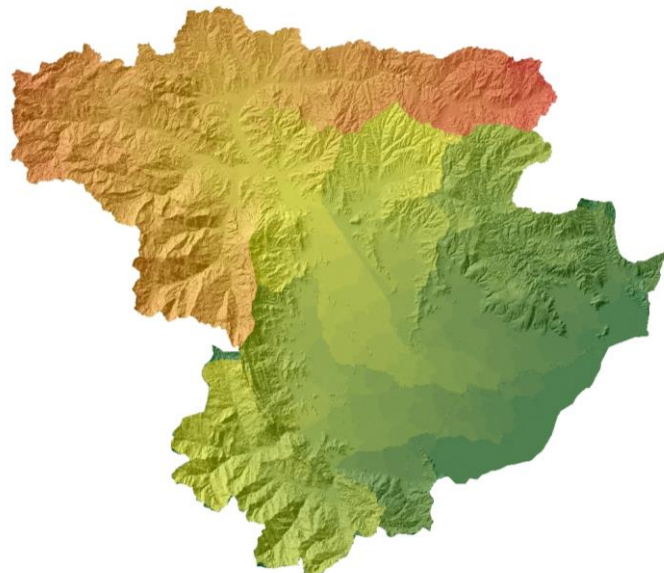
Η μέθοδος προέκυψε από ανάλυση του ΨΜΕ το οποίο περιέχει σφάλματα. Για να διορθωθούν, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση για την ομαλοποίηση του καθοδικού κλάδου.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-6. Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζονται γραφικά όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές με τον μεγαλύτερο χρόνο απορροής.

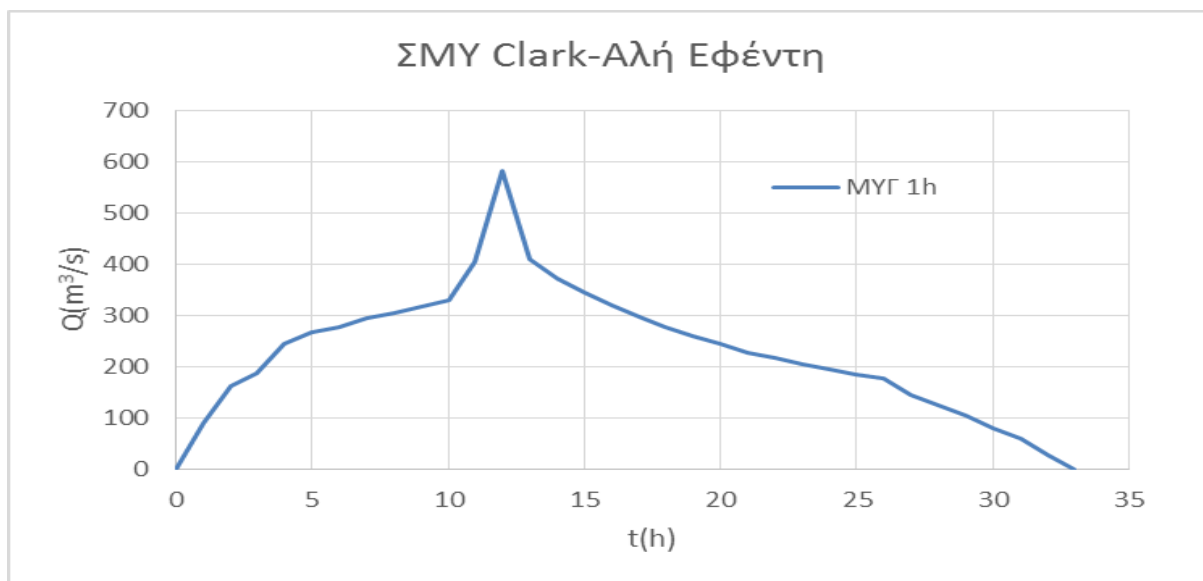
Η τιμή της παροχής αιχμής που προκύπτει είναι  $582.13 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Πίνακας 5-5: Παράμετροι υπολογισμού μεθόδου IUH Clark Αλή Εφέντη**

Παράμετροι	Τιμές
CN	67
S (m/m)	0.32
Longest (feet)	478674.54
Tlag (h)	18.92
Tc (h)	31.53



**Σχήμα 5-6: Γραφικό αποτέλεσμα λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη κατά IUH Clark**



Σχήμα 5-7:ΣΜΥΓ κατά Clark

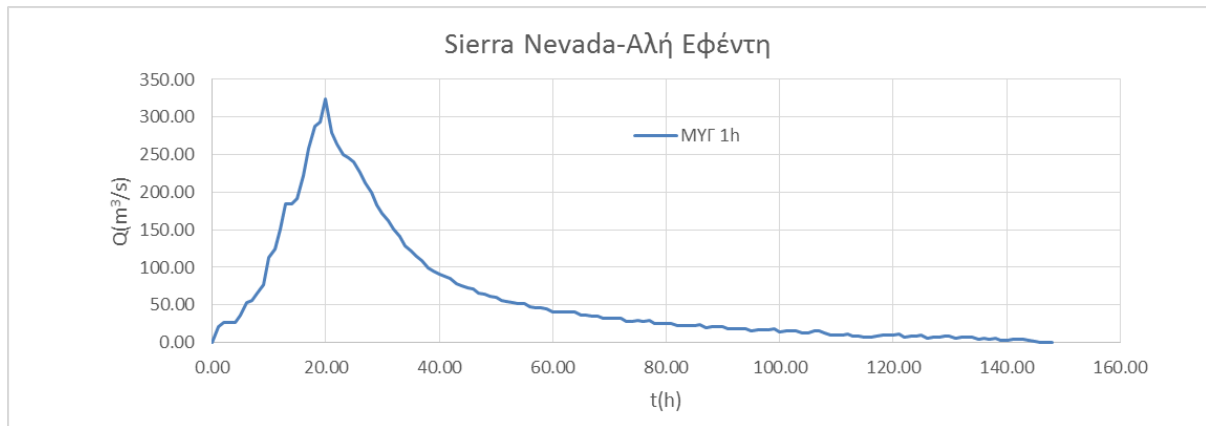
### 5.2.6 Μέθοδος Sierra Nevada

Με την εφαρμογή της μεθόδου της Sierra Nevada, η διάρκεια βροχής υπολογίστηκε στις 4.4 h. Ωστόσο η ζητούμενη διάρκεια ήταν η μία ώρα. Επομένως το χρειάστηκε να γίνει μετατροπή της διάρκειας του ΜΥΓ μέσω του αθροιστικού υδρογραφήματος  $S$ . Και σε αυτή την περίπτωση το παραχθέν ΜΥΓ ομαλοποιήθηκε με βελτιστοποίηση. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-6.

Πίνακας 5-6: Παράμετροι υπολογισμού μεθόδου Sierra Nevada

$K_n$	0.12
$C$	3.12
$L$ (km)	139.00
$L_c$ (km)	62.90
$S$ (m/m)	0.01
$N$	0.33
$t_L$ (h)	24.22
$t_R$ (h)	4.40
$t_m$	0.26
$Q_m$	12.17

Στο Σχήμα 5-8 παρουσιάζεται το διορθωμένο ΜΥΓ. Η παροχή αιχμής υπολογίστηκε 323.79 m<sup>3</sup>/s



**Σχήμα 5-8: ΜΥΓ κατά την μέθοδο Sierra Nevada στην λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη**

### **5.2.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα**

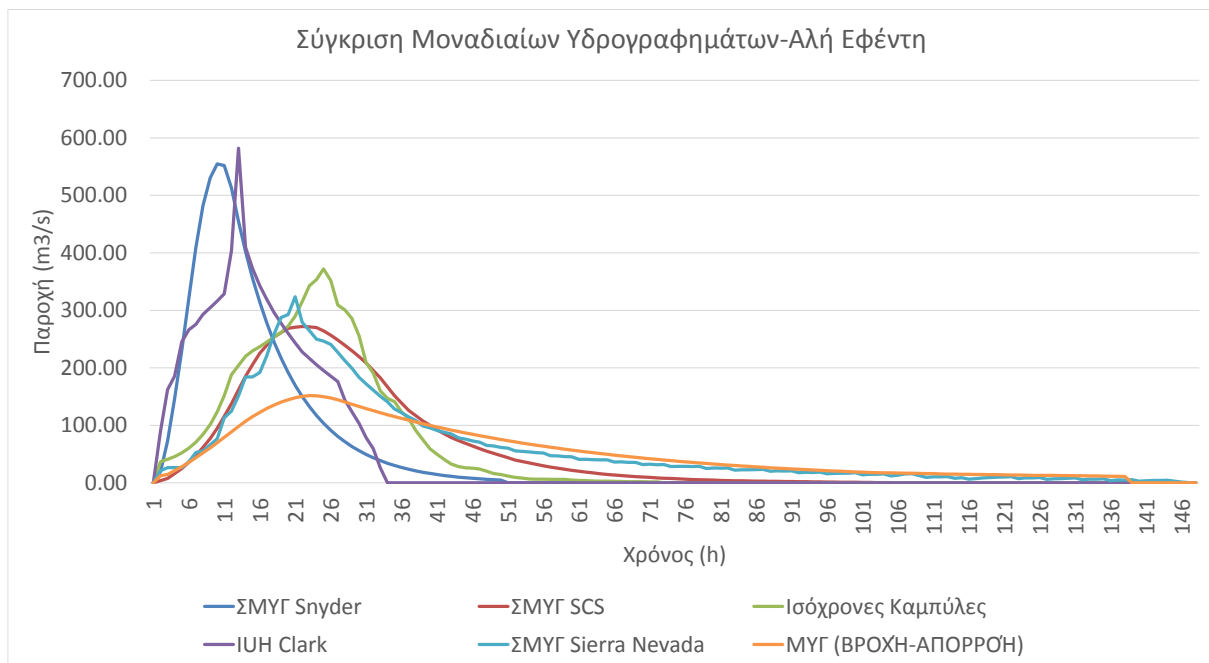
Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 5-7 και γραφικά στο Σχήμα 5-9.



**Πίνακας 5-7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη**

Αλή Εφέντη							
	Snyder	SCS	Br.Iv Υδρολογίας	Ισόχρονες	IUH Clark	ΜΥΓ (βρ-απ)	Sierra Nevada
T (h)	50	106	292	84	33	137	148
Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	554.80	272.00	52.78	371.92	582.13	151.59	323.79
V (hm <sup>3</sup> )	27.79	27.78	27.73	27.73575	27.79	27.03	31.79
ταιχμ (h)	9.00	21.00	116.00	24.00	12.00	22.00	20.00
q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	0.200	0.098	0.019	0.134	0.210	0.055	0.117

Όπως προκύπτει από την παρατήρηση του Σχήμα 5-9 και οι πέντε μέθοδοι υπερεκτιμούν σε μεγάλο βαθμό την παροχή αιχμής.



**Σχήμα 5-9:Συγκεντρωτικό γράφημα αποτελεσμάτων λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη**

## 5.3 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Πορταϊκού

### 5.3.1 Μέθοδος Snyder

Η εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος έγινε με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS.

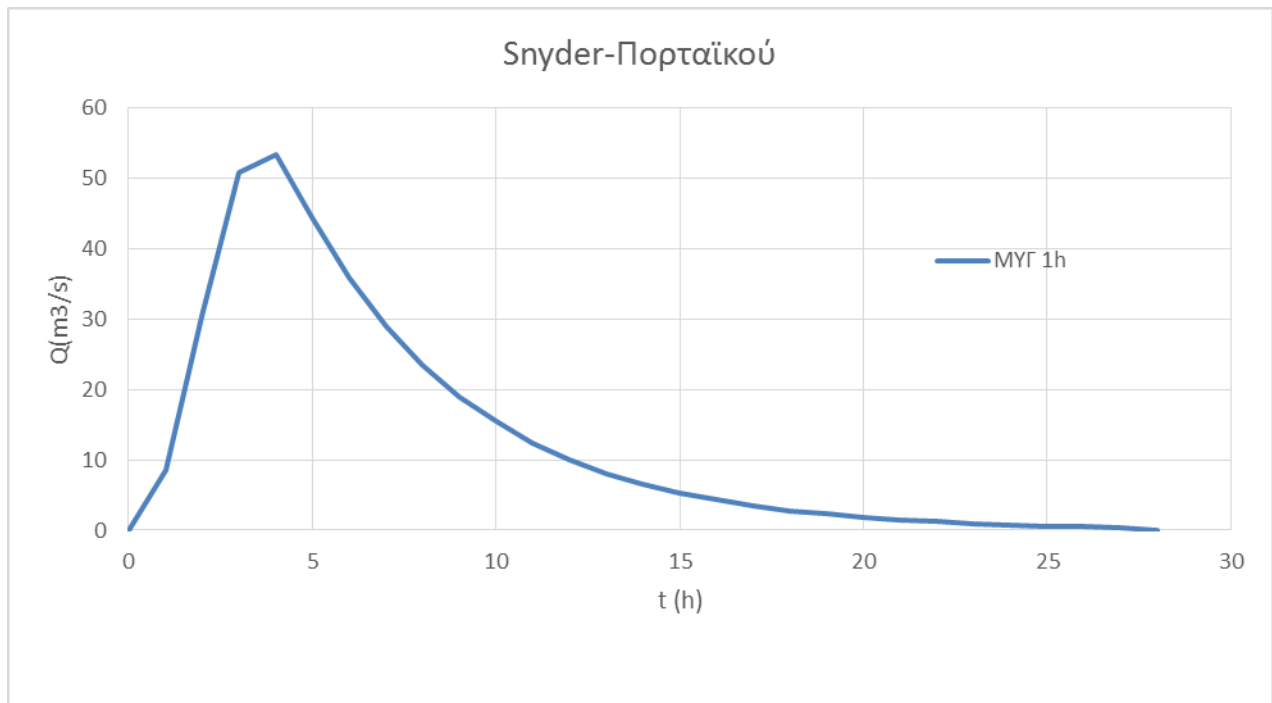
**Πίνακας 5-8: Τιμές παραμέτρων**

L (km)	21.57
Lc (km)	10.20
Ct	0.80
Cq	0.45
tp (hr)	3.03

Η τιμή του συντελεστή  $C_q$  λήφθηκε η ίδια από διδακτορική διατριβή που πραγματοποιήθηκε για την ίδια λεκάνη (Μπαλτάς, 1996)

Για την τιμή του συντελεστή  $C_t$  έγινε μια συνήθης παραδοχή

Το αποτέλεσμα της μεθόδου δίνει τιμή παροχής αιχμής  $53.40 \text{ m}^3/\text{s}$ , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-10.



**Σχήμα 5-10: MYG κατά Snyder**

### 5.3.2 Μέθοδος SCS

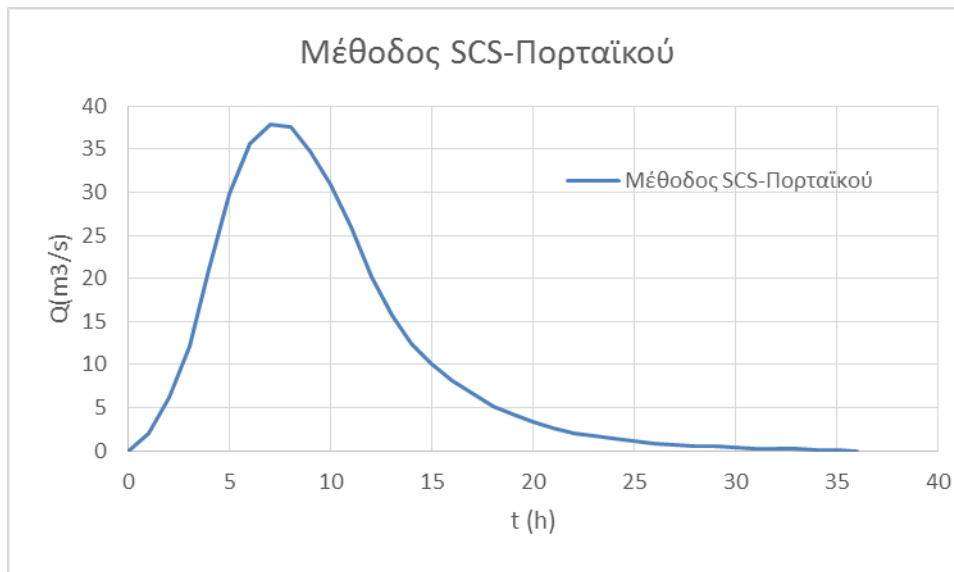
Η εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος έγινε με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS.

Τα δεδομένα εισόδου αναφέρονται στον Πίνακα 5.9.

Η εφαρμογή της μεθόδου δίνει το MYG που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-11..

**Πίνακας 5-9: Στοιχεία εισόδου**

$t_p$ (hr)	7.36
$t_R$ (h)	1
$t_L$ (min)	411.7946
Ct	1.8
L (km)	22
Lc (km)	10.20



**Σχήμα 5-11: Μοναδιαίο υδρογράφημα της μεθόδου SCS για την λεκάνη απορροής Πορταϊκού**

### 5.3.3 Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-10.

**Πίνακας 5-10: Τιμές παραμέτρου μεθόδου Βρετανικού Ιν. Υδρολογίας**

L (km)	139.00
S1085 (m/km)	5.79
URBAN (%)	5.00
RSMD (mm)	85
$t_p$ (hr)	116.06
$t_b$ (hr)	292.48
$Q_p$ (m <sup>3</sup> /s)	52.78

Η παράμετρο URBAN αναφέρεται στο ποσοστό των αστικών εκτάσεων της περιοχής μελέτης

Η παράμετρο RMSD αναφέρεται στο μέγιστο καθαρό επιφανειακό ύψος βροχής διάρκειας 24 h, και έγινε η παραδοχή των 85 mm.

Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι ένα ΣΜΥΓ με μεγάλο χρόνο βάσης και μικρή παροχή αιχμής όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-14.



Σχήμα 5-12: Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα για την λεκάνη απορροής Πορταϊκού

### 5.3.4 Μέθοδος Ισόχρονων καμπυλών

Για την μέθοδο των Ισόχρονων καμπυλών έγιναν οι εξής παραδοχές για τις ταχύτητες του υδρογραφικού δικτύου, ανάλογα με την τάξη στην οποία ανήκει κάθε τμήμα του.

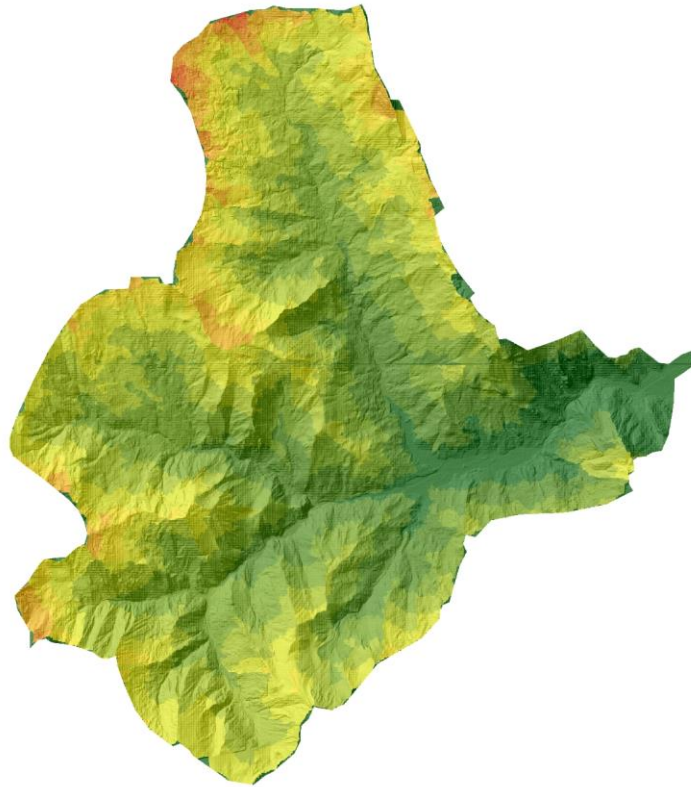
Το κατώφλι έκτασης για την αναγνώριση του υδρογραφικού δικτύου προέκυψε 1.0 km<sup>2</sup>

Η μέση ταχύτητα χερσαίας ροής, η μέση ταχύτητα ροής της λεκάνης καθώς και η μέση τιμή του συντελεστή k πολλαπλασιασμένη επί 100 αναφέρονται στον Πίνακα 5-11.

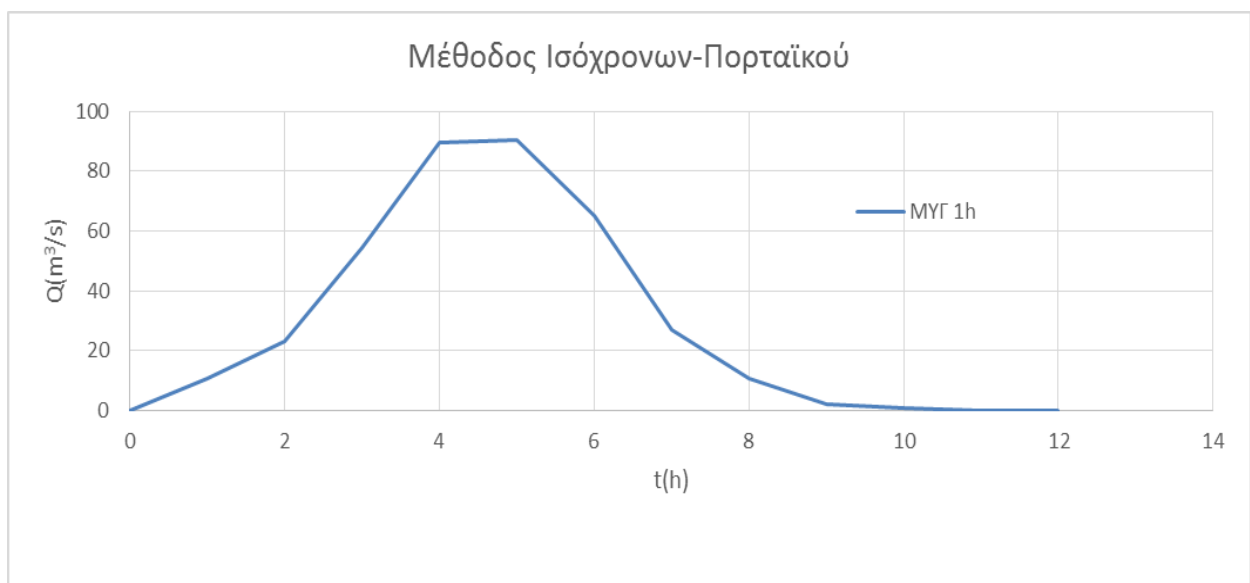
Πίνακας 5-11: Παράμετροι εισόδου Ισόχρονων καμπυλών

	κατώφλι υδρογραφικού δικτύου (km <sup>2</sup> )	Ταχύτητες τάξεων υδρ. Δικτύου (m/s)					Μέση ταχύτητας χερσαίας ροής (m/s)	Μέση ταχύτητα ροής λεκάνης( m/s)	Μέση τιμή συντελεστ ή k*100
		1	2	3	4	5			
Τιμές	1.00	0.8	1	1.2	1.4	-	0.29	0.3	42

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-13 όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές με τον μεγαλύτερο χρόνο απορροής. Στο Σχήμα 5-14 απεικονίζεται το ΜΥΓ. Η τιμή παροχής αιχμής υπολογίστηκε  $90.18 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Σχήμα 5-13: Ισόχρονες καμπύλες Πορταϊκού**



**Σχήμα 5-14: ΜΥΓ κατά την μέθοδο Ισόχρονων καμπυλών στην λεκάνη Πορταϊκού**  
Στον Πίνο

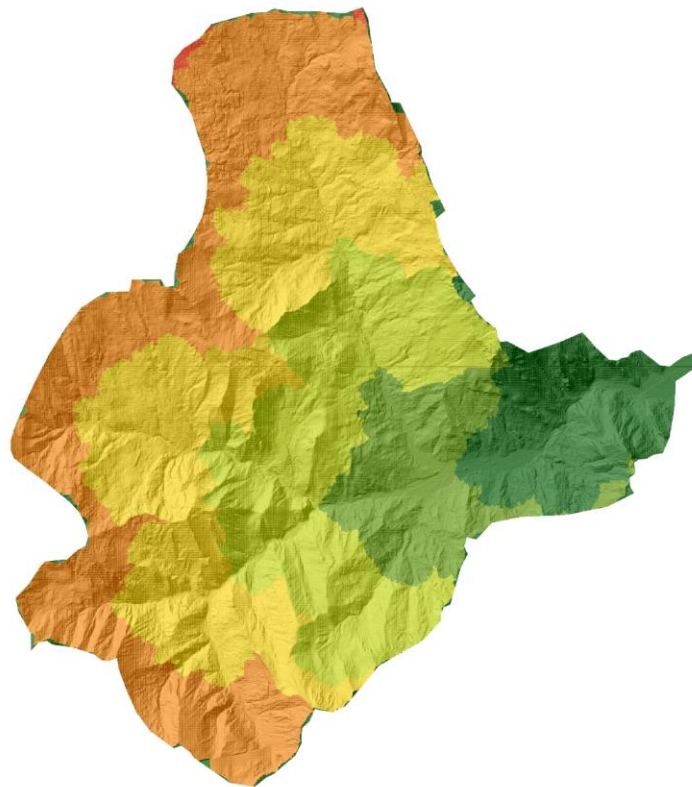
Η μέθοδος προέκυψε από ανάλυση του ΨΜΕ το οποίο περιέχει σφάλματα. Για να διορθωθούν, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση για την ομαλοποίηση του καθοδικού κλάδου.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-16. Στο Σχήμα 5-15 παρουσιάζονται γραφικά όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές με τον μεγαλύτερο χρόνο απορροής.

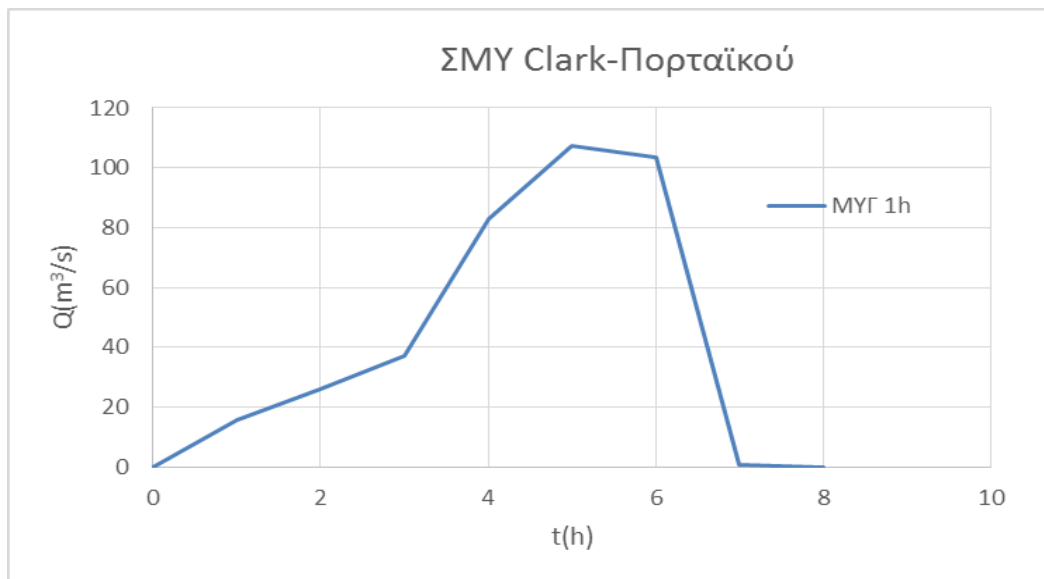
Η τιμή της παροχής αιχμής που προκύπτει είναι 107.39 m<sup>3</sup>/s.

**Πίνακας 5-12: Παράμετροι υπολογισμού μεθόδου IUH Clark Πορταϊκού**

Παράμετροι	Τιμές
CN	61
S (m/m)	0.54
Longest (feet)	70767.72
Tlag (h)	3.68
Tc (h)	6.13



**Σχήμα 5-15: Γραφικό αποτέλεσμα λεκάνης απορροής Πορταϊκού κατά Clark**



**Σχήμα 5-16: ΣΜΥ κατά Clark**

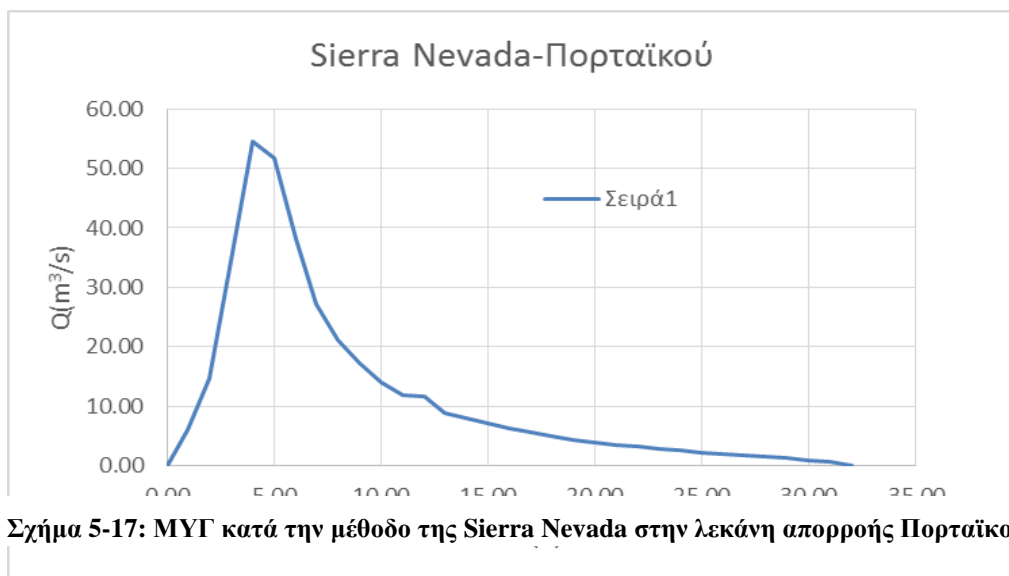
### 5.3.6 Μέθοδος Sierra Nevada

Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-13.

Στο Σχήμα 5-17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Η παροχή αιχμής υπολογίστηκε 54.50 m³/s

**Πίνακας 5-13: Παράμετροι υπολογισμού μεθόδου Sierra Nevada**

Kn	0.12
C	3.12
L (km)	21.57
L <sub>c</sub> (km)	10.20
S (m/m)	0.06
N	0.33
t <sub>L</sub> (h)	5.27
t <sub>R</sub> (h)	1.00
t <sub>m</sub>	0.06
Q <sub>m</sub>	2.69



Σχήμα 5-17: ΜΥΓ κατά την μέθοδο της Sierra Nevada στην λεκάνη απορροής Πορταϊκού

### 5.3.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 5-14 και στο Σχήμα 5-18.

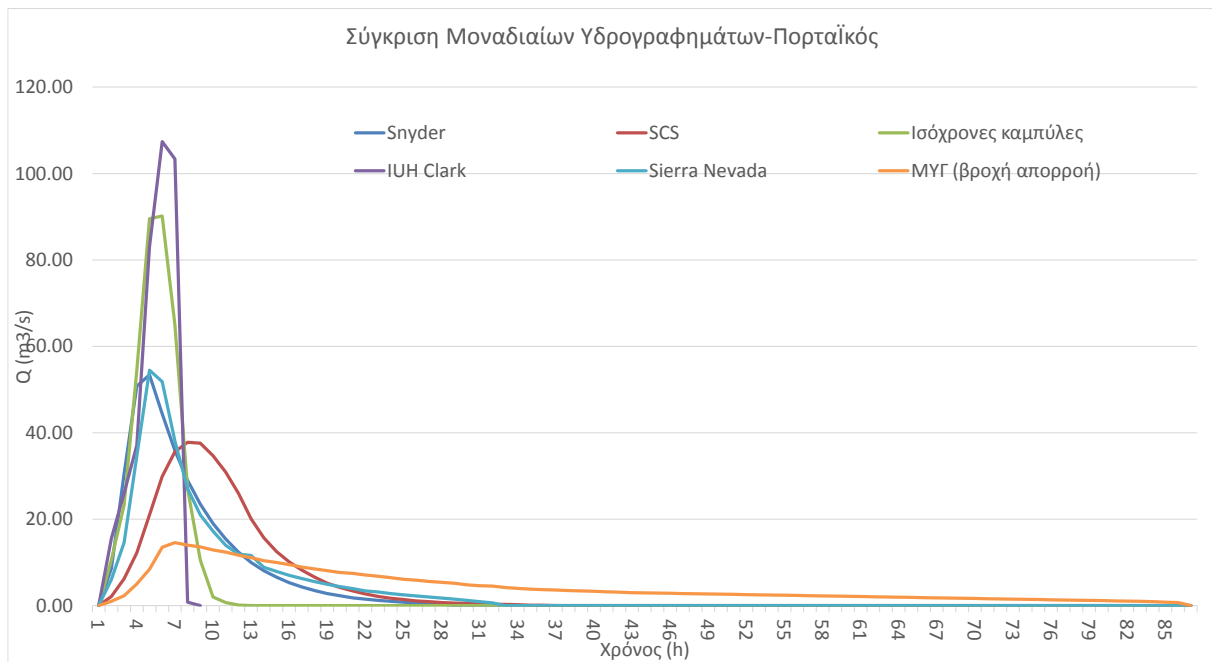
Πίνακας 5-14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα λεκάνης απορροής Πορταϊκού

	Πορταϊκός						
	Snyder	SCS	Br.Iv Υδρολογίας	Ισόχρονες	IUH Clark	ΜΥΓ (βρ-απ)	Sierra Nevada
T (h)	28	36	110	12	8	91	32
Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	53.40	37.80	6.80	90.18	107.39	14.60	54.50
V (hm <sup>3</sup> )	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.35	1.34
ταιχμ (h)	4.00	7.00	44.00	5.00	5.00	7.00	4.00
q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	0.397	0.281	0.051	0.671	0.799	0.109	0.405

Στο Σχήμα 5-18 είναι εμφανής ο μεγάλος χρόνος βάσης του υπολογισμένου ΜΥΓ, η μικρή παροχή που δίνει, σε αντίθεση με τις υψηλές τιμές για το ίδιο μέγεθος που δίνουν τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα ιδιαίτερα αυτά που προέκυψαν από την επεξεργασία ΨΜΕ σε περιβάλλον ΣΓΠ.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μεγάλη ομοιότητα που παρουσιάζουν για την συγκεκριμένη λεκάνη η μέθοδος Snyder με την Sierra Nevada.





Σχήμα 5-18: Συγκεντρωτικό γράφημα αποτελεσμάτων λεκάνης απορροής Πορταϊκού

## 5.4 Αποτελέσματα λεκάνης απορροής Βενέτικου

### 5.4.1 Μέθοδος Snyder

Η εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος έγινε με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS.

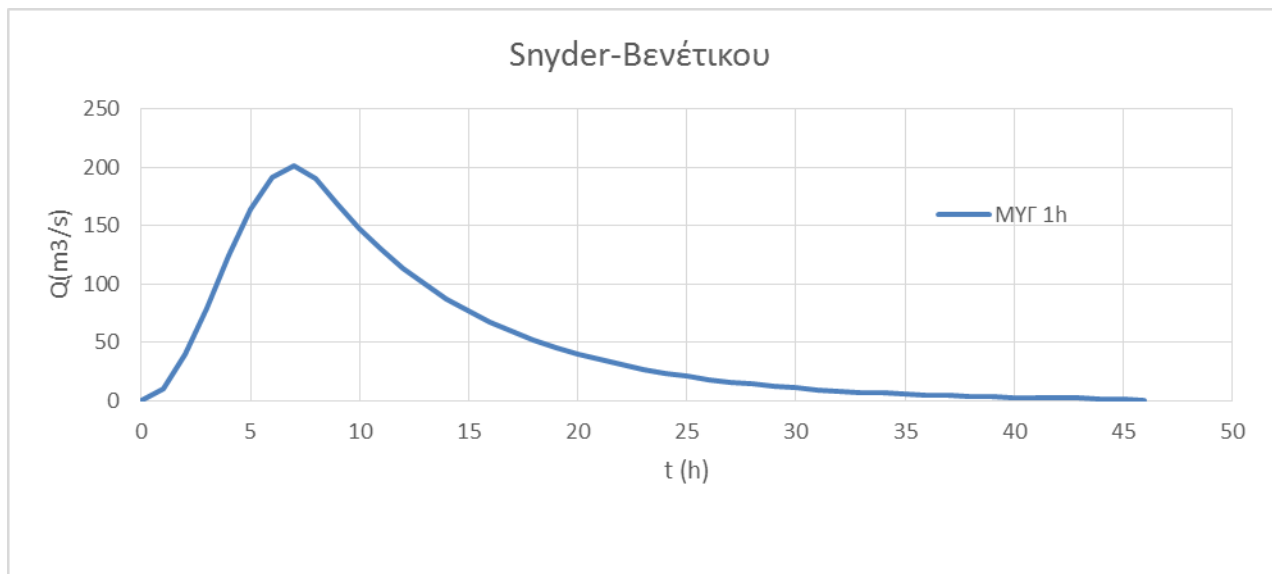
Πίνακας 5-15: Τιμές παραμέτρων

L (km)	85.83
Lc (km)	33.10
Ct	0.80
Cq	0.55
tr (hr)	6.52

Η τιμή του συντελεστή  $C_q$  λήφθηκε η ίδια από διδακτορική διατριβή που πραγματοποιήθηκε για την ίδια λεκάνη (Μπαλτάς, 1996)

Για την τιμή του συντελεστή  $C_t$  έγινε μια συνήθης παραδοχή

Το αποτέλεσμα της μεθόδου δίνει πολύ υψηλές τιμές παροχής αιχμής, 201.10 m<sup>3</sup>/s, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-19.



**Σχήμα 5-19: ΜΥΓ κατά Snyder**

#### **5.4.2 Μέθοδος SCS**

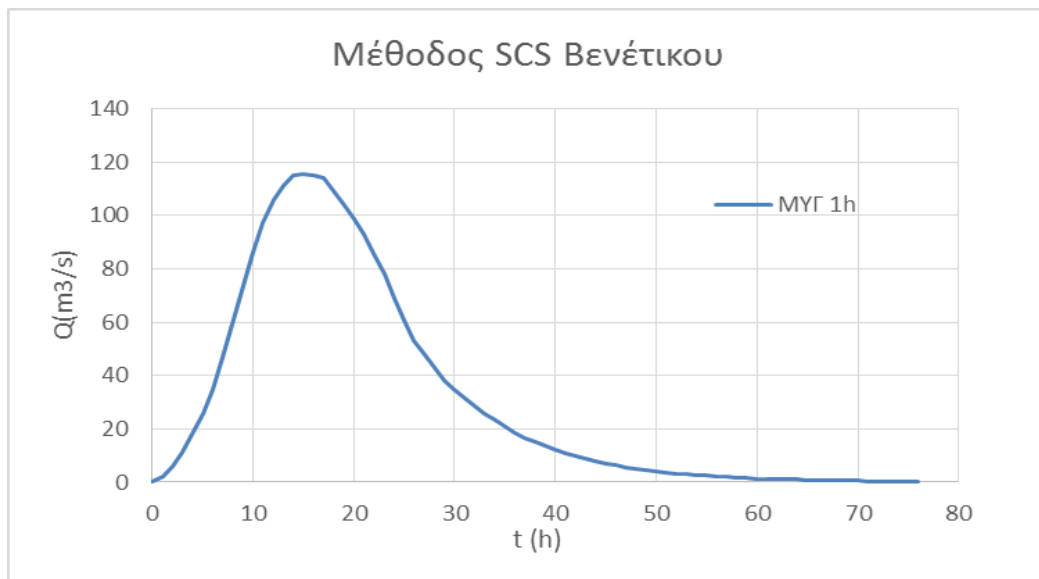
Η εξαγωγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος έγινε με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS.

Τα δεδομένα εισόδου αναφέρονται στον Πίνακα 5-16.

Η εφαρμογή της μεθόδου δίνει όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-20 με αιχμή 115.50 m<sup>3</sup>/s.

**Πίνακας 5-16: Στοιχεία εισόδου**

$t_p$	15.29
$t_R$ (h)	1
$t_L$ (min)	887.12
$C_t$	1.8
$L$ (km)	86
$L_c$ (km)	33.10



Σχήμα 5-20: ΜΥΓ κατά SCS

### 5.4.3 Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-17.

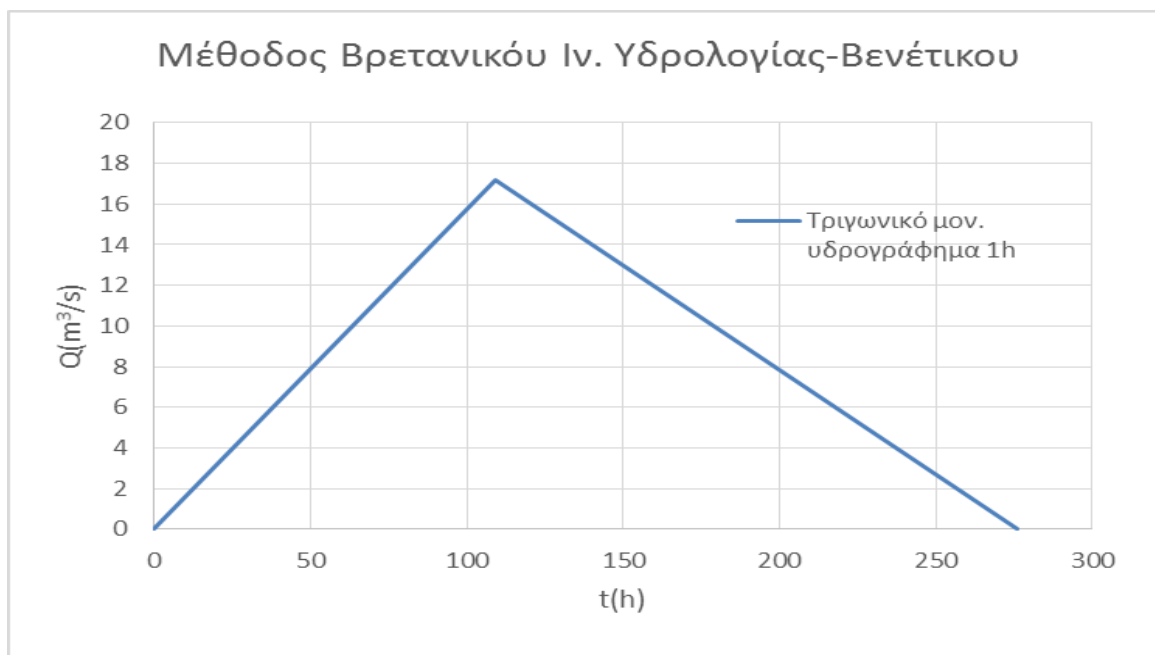
Πίνακας 5-17: Τιμές παραμέτρου Βρετανικού Ιν. Υδρολογίας

L (km)	139.00
S1085 (m/km)	5.79
URBAN (%)	5.00
RSMD (mm)	85
tp (hr)	116.06
tb (hr)	292.48
Qp (m <sup>3</sup> /s)	52.78

Η παράμετρο URBAN αναφέρεται στο ποσοστό των αστικών εκτάσεων της περιοχής μελέτης

Η παράμετρο RSMD αναφέρεται στο μέγιστο καθαρό επιφανειακό ύψος βροχής διάρκειας 24 h, και έγινε η παραδοχή των 85 mm.

Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι ένα ΣΜΥΓ με μεγάλο χρόνο βάσης και μικρή παροχή αιχμής όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-21.



Σχήμα 5-21: Τριγωνικό ΜΥΓ κατά μέθοδο Βρετανικού Ιν. Υδρολογίας

#### 5.4.4 Μέθοδος Ισόχρονων καμπυλών

Για την μέθοδο των Ισόχρονων καμπυλών έγιναν οι εξής παραδοχές για τις ταχύτητες του υδρογραφικού δικτύου, ανάλογα με την τάξη στην οποία ανήκει κάθε τμήμα του.

Το κατώφλι έκτασης για την αναγνώριση του υδρογραφικού δικτύου προέκυψε 1.2 km<sup>2</sup>

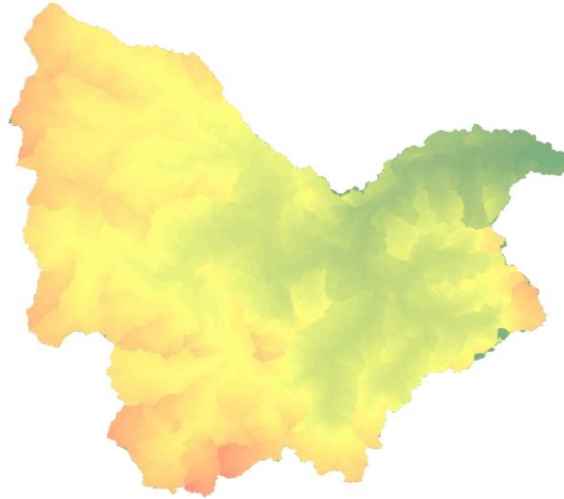
Η μέση ταχύτητα χερσαίας ροής, η μέση ταχύτητα ροής της λεκάνης καθώς και η μέση τιμή του συντελεστή k πολλαπλασιασμένη επί 100 αναφέρονται στον Πίνακα 5-18. Η μέθοδος προέκυψε από ανάλυση του ΨΜΕ το οποίο περιέχει σφάλματα. Για να διορθωθούν, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση για την ομαλοποίηση του καθοδικού κλάδου

Πίνακας 5-18: Παράμετροι μεθόδου Ισόχρονων καμπυλών

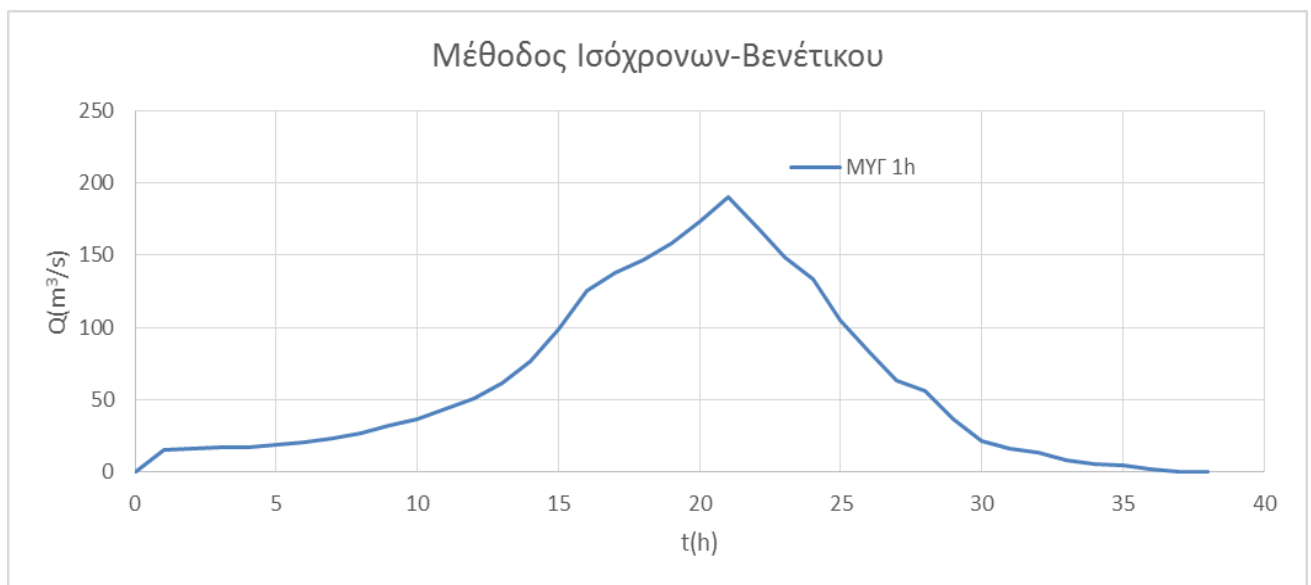
	κατώφλι υδρογραφικού δικτύου (km <sup>2</sup> )	Ταχύτητες τάξεων υδρ. Δικτύου (m/s)					Μέση ταχύτητας χερσαίας ροής (m/s)	Μέση ταχύτητα ροής λεκάνης (m/s)	Μέση τιμή συντελεστή k*100
		1	2	3	4	5			
Τιμές	1.2	0.8	1	1.2	1.4	-	0.23	0.24	44

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-22 όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές με τον μεγαλύτερο χρόνο απορροής. Στο Σχήμα 5-23 απεικονίζεται το ΜΥΓ.

Η τιμή παροχής αιχμής υπολογίστηκε 190.49 m<sup>3</sup>/s.



Σχήμα 5-22: Ισόχρονες καμπύλες Βενέτικου



Σχήμα 5-23: ΜΥΓ κατά την μέθοδο Ισόχρονων καμπυλών στην λεκάνη Βενέτικου

#### 5.4.5 Μέθοδος IUH Clark

Στον Πίνακα 5-19 παρουσιάζονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν.

Η μέθοδος προέκυψε από ανάλυση του ΨΜΕ το οποίο περιέχει σφάλματα. Για να διορθωθούν, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση για την ομαλοποίηση του καθοδικού κλάδου.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5-25. Στο Σχήμα 5-25 παρουσιάζονται γραφικά όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι περιοχές με τον μεγαλύτερο χρόνο απορροής.

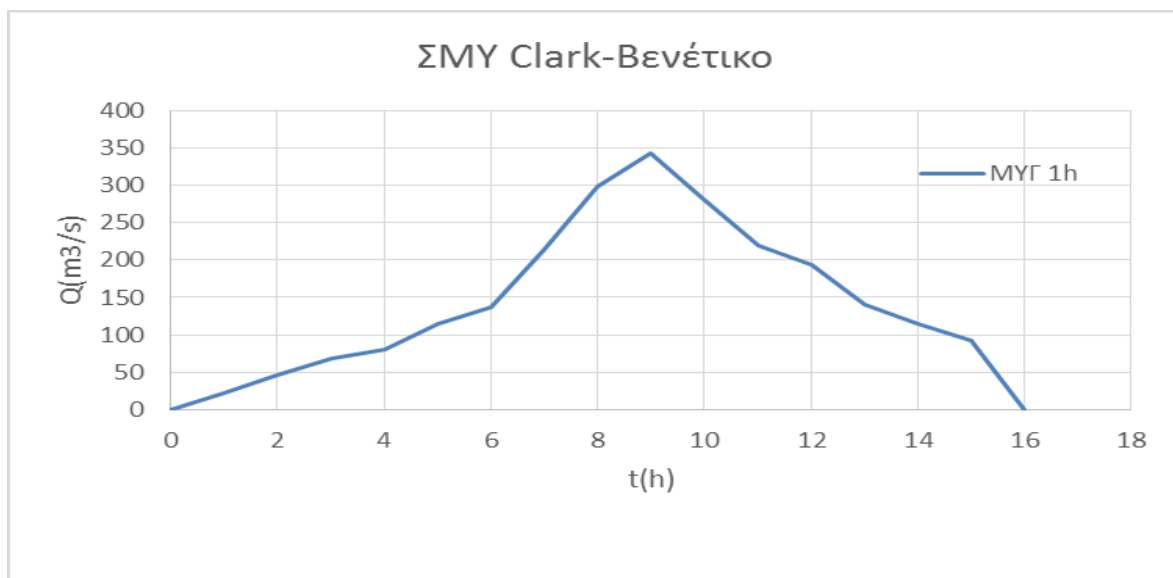
Η τιμή της παροχής αιχμής που προκύπτει είναι 342.87 m<sup>3</sup>/s.

**Πίνακας 5-19: Παράμετροι υπολογισμού μεθόδου IUH Clark Βενέτικου**

Παράμετροι	Τιμές
CN	74
S (m/m)	0.35
Longest (feet)	252877.30
Tlag (h)	8.97
Tc (h)	14.95



**Σχήμα 5-24: Γραφικό αποτέλεσμα λεκάνης απορροής Βενέτικου κατά IUH Clark**



### Σχήμα 5-25: ΣΜΥ κατά Clark

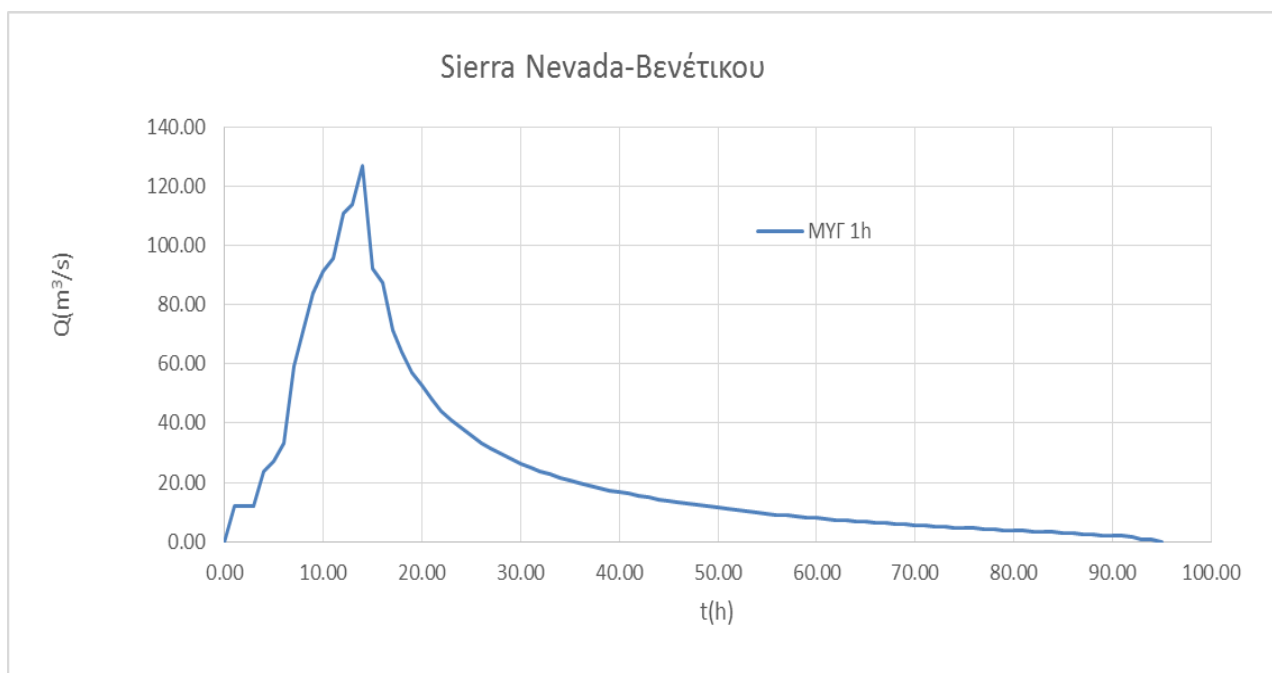
#### 5.4.6 Μέθοδος Sierra Nevada

Με την εφαρμογή της μεθόδου της Sierra Nevada, η διάρκεια βροχής υπολογίστηκε στις 3.3 h. Ωστόσο η ζητούμενη διάρκεια ήταν η μία ώρα. Επομένως το χρειάστηκε να γίνει μετατροπή της διάρκειας του ΜΥΓ μέσω του αθροιστικού υδρογραφήματος  $S$ . Και σε αυτή την περίπτωση το παραχθέν ΜΥΓ ομαλοποιήθηκε με βελτιστοποίηση. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-20.

Πίνακας 5-20: Παράμετροι υπολογισμού μεθόδου Sierra Nevada

$K_n$	0.12
$C$	3.12
$L$ (km)	85.83
$L_c$ (km)	33.10
$S$ (m/m)	0.01
$N$	0.33
$t_L$ (h)	16.44
$t_R$ (h)	3.00
$t_m$	0.18
$Q_m$	5.49

Στο Σχήμα 5-26 παρουσιάζεται το διορθωμένο ΜΥΓ. Η παροχή αιχμής υπολογίστηκε 126.66 m<sup>3</sup>/s



Σχήμα 5-26: ΜΥΓ κατά την μέθοδο της μεθόδου Sierra Nevada στην λεκάνη απορροής Βενέτικου

### 5.4.7 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Τα παραπάνω αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5-21 και στο Σχήμα 5-27.

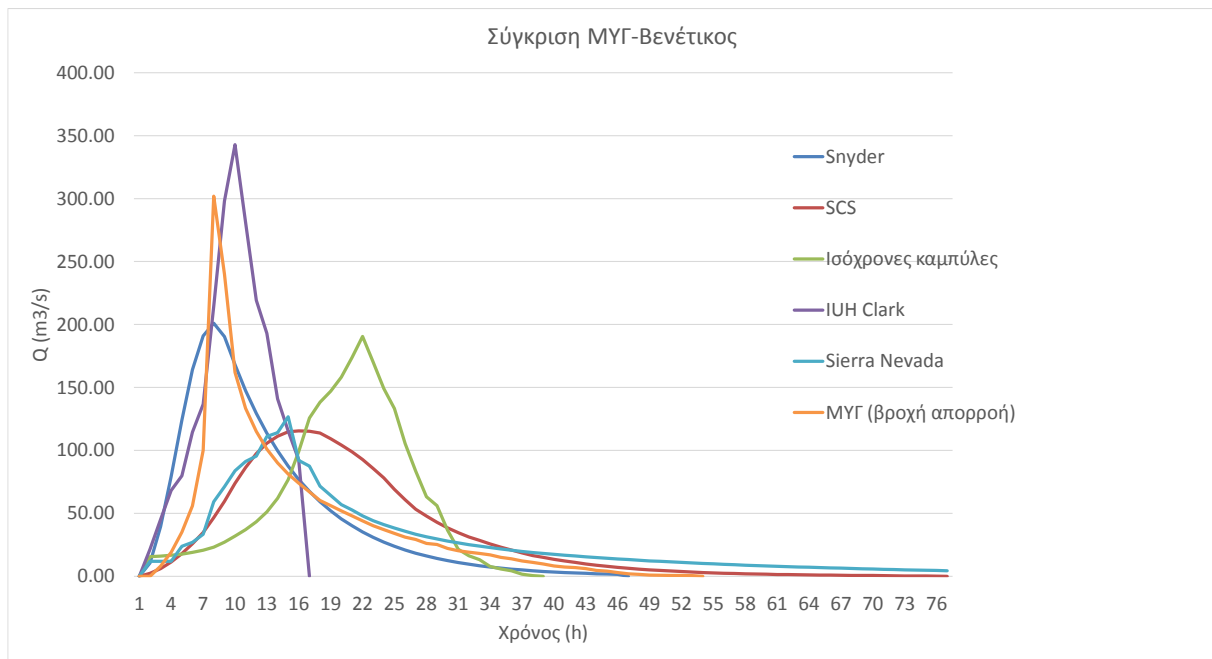
**Πίνακας 5-21: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα λεκάνης απορροής Βενέτικου**

Βενέτικο							
	Snyder	SCS	Br.Iv Υδρολογίας	Ισόχρονες	IUH Clark	MYΓ (βρ-απ)	Sierra Nevada
T (h)	46	76	276	38	16	52	95
Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	201.10	115.50	17.15	190.49	342.87	302.00	126.66
V (hm <sup>3</sup> )	8.51	8.51	8.53	8.49	8.51	8.18	8.07
ταιχμ (h)	7.00	15.00	109.00	21.00	9.00	7.00	14.00
q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	0.236	0.136	0.020	0.224	0.403	0.355	0.149

Στο Σχήμα 5-27 ενδιαφέρον παρουσιάζει η υψηλή τιμή παροχής αιχμής του υπολογισμένου MYΓ και το γεγονός ότι οι μέθοδοι των συνθετικών MYΓ (εκτός της μεθόδου Snyder), υποεκτιμούν την τιμή αυτού του κρίσιμου μεγέθους, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα των δύο άλλων λεκανών απορροής.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον στοιχείο προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου των ισόχρονων καμπυλών, που το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της οποίας παρουσιάζει την αιχμή του μετά το ήμισυ του χρόνου βάσης του.





Σχήμα 5-27: συγκεντρωτικό γράφημα αποτελεσμάτων λεκάνης απορροής Βενέτικου

## 5.5 Δείκτες αξιολόγησης αποτελεσμάτων λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη

Πίνακας 5-22: Δείκτες αποτελεσματικότητας λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη

Δείκτες Αποτελεσματικότητας-Λεκάνης απορροής Αλή Εφέντη				
	Nash-Sutcliffe- $E_r$	Δείκτης PEV(%)	Δείκτης PEPF(%)	Διαφορά $\Delta T$ (min)
Snyder	-21.26	2.81	265.99	780
SCS	-0.40	2.80	79.43	60
Βρετανικό Ιν. Υδρολογίας	-1.00	2.80	65.18	5640
Μέθοδος Ισόχρονων	-3.01	2.62	145.35	120
Clark IUH	-1.71	2.81	284.02	600
Sierra Nevada	0.26	17.61	113.60	120

## 5.6 Δείκτες αξιολόγησης αποτελεσμάτων λεκάνης απορροής Πορταϊκού

Για την λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού, η εφαρμογή των μεθόδων δείχνει ότι δεν μπορεί να προσομοιώσει σε ικανοποιητικό βαθμό το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης. Παρατηρείται επίσης υπερεκτίμηση της τιμής παροχής αιχμής. Στον Πίνακα 5-23 παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών.

Ένα ακόμα ενδιαφέρον στοιχείο είναι ότι δείκτης Nash-Sutcliffe-Ef λαμβάνει αρνητικές τιμές για όλες τις μεθόδους. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την μεγάλη τιμή του χρόνου βάσης του υπολογισμένου ΜΥΓ.

**Πίνακας 5-23: Δείκτες αποτελεσματικότητας λ.α Πορταϊκού**

Δείκτες Αποτελεσματικότητας-Λεκάνης απορροής-Πορταϊκού				
	Nash-Sutcliffe-E <sub>f</sub>	Δείκτης PEV(%)	Δείκτης PEPF(%)	Διαφορά ΔT (min)
Snyder	-16.57	0.01	265.75	180
SCS	-5.91	0.06	158.90	0
Βρετανικό Iv. Υδρολογίας	-0.73	0.38	53.44	2220
Μέθοδος Ισόχρονων	-53.65	0.08	517.69	120
Clark IUH	-81.62	0.08	635.55	120
Sierra Nevada	-11.44	0.07	273.26	180

## 5.7 Δείκτες αξιολόγησης αποτελεσμάτων λεκάνης απορροής Βενέτικου

Στον Πίνακα 5-24 παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Για την λεκάνη απορροής του Βενέτικου, οι τιμές που λαμβάνουν οι δείκτες είναι ενθαρρυντικοί. Ιδιαίτερα βελτιωμένοι σε σχέση με τις άλλες δύο λεκάνες απορροής, είναι ο δείκτης Nash-Sutcliffe-E<sub>f</sub>, όπως επίσης και ο δείκτης που αναφέρεται στην παροχή αιχμής.

**Πίνακας 5-24: Δείκτες αποτελεσματικότητας λ.α Βενέτικου**

Δείκτες Αποτελεσματικότητας-Λεκάνης απορροής-Βενέτικου				
	Nash-Sutcliffe-E <sub>f</sub>	Δείκτης PEV(%)	Δείκτης PEPF(%)	Διαφορά ΔT (min)
Snyder	0.72	4.03	33.41	0
SCS	0.23	4.00	61.75	480
Βρετανικό Iv. Υδρολογίας	-0.47	4.22	94.32	6120
Μέθοδος Ισόχρονων	-0.83	3.76	36.92	840
Clark IUH	-0.85	4.01	13.53	120
Sierra Nevada	0.94	4.03	58.06	420

## 5.8 Σύγκριση ειδικής παροχής

Η τιμή της ειδικής παροχής ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ ) είναι μεγαλύτερη για μικρότερες λεκάνες απορροής. Για την επαλήθευση αυτού του συμπεράσματος έγινε έλεγχος των αποτελεσμάτων και σύγκριση των ειδικών παροχών κάθε μεθόδου για τις τρεις λεκάνες. Στον Πίνακα 5-25 παρουσιάζεται η σύγκριση και αποδεικνύεται ότι όλες οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν επαληθεύουν το συμπέρασμα. Ωστόσο, το μοναδιαίο υδρογράφημα για τον Πορταϊκό ποταμό φαίνεται αρχικά να παρουσιάζει σφάλμα στα δεδομένα βροχής απορροής, διότι η ειδική παροχή είναι μικρότερη από το μοναδιαίο υδρογράφημα του Βενέτικου ποταμού. Ωστόσο, σύμφωνα με διδακτορική διατριβή που περιείχε την συγκεκριμένη λεκάνη απορροής στην περιοχή μελέτης, το γεγονός αιτιολογήθηκε από το είδος βλάστησης που κυριαρχεί στην περιοχή, μιας και διαπιστώθηκε η απρόσκοπτη λειτουργία του σταθμηγράφου που υπάρχει στην περιοχή (Μπαλτάς, 1996).

**Πίνακας 5-25: Παρουσίαση ειδικών παροχών**

Λεκάνη απορροής	$q_{\max}$ ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ )						
	Snyder	SCS	Br.Iv Υδρολογίας	Ισόχρονες	IUH Clark	MYG (βρ-απ)	Sierra Nevada
Αλή Εφέντη	0.200	0.098	0.019	0.134	0.210	0.055	0.117
Βενέτικος	0.236	0.136	0.020	0.224	0.403	0.355	0.149
Πορταϊκός	0.397	0.281	0.051	0.671	0.799	0.109	0.405

## 6 Συμπεράσματα

---

### 6.1 Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν 6 μέθοδοι υπολογισμού συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος για τρεις λεκάνες της Ελλάδας, του Αλή Εφέντη με έκταση 2778 km<sup>2</sup>, του Πορταϊκού με 134 km<sup>2</sup> και του Βενέτικου με 851 km<sup>2</sup> με εκτάσεις . Οι μέθοδοι Snyder, SCS, Sierra Nevada, Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας έχουν προκύψει από ανάλυση που έχει πραγματοποιηθεί σε λεκάνες του εξωτερικού, μάλιστα, η μέθοδος SCS για λεκάνες πολύ μικρής έκτασης. Ακόμα, οι περισσότερες λεκάνες απορροής στην Ελλάδα δεν είναι γραμμικές. Τα παραπάνω στοιχεία εκ των προτέρων προμηνύουν την όχι τόσο επιτυχημένη εφαρμογή των μεθόδων.

Την κατάρτιση των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων κατά της μεθόδους Snyder, SCS, Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας ακολούθησε ο υπολογισμός στιγμιαίων υδρογραφημάτων, μέσω τη χρήσης ΣΓΠ, κατά Clark και κατά την μέθοδο των Ισόχρονων καμπυλών. Στις δύο τελευταίες μεθόδους, εκτός της απαιτητικής επεξεργασίας σε περιβάλλον ΣΓΠ ιδιαίτερα για την τελευταία, υπεισέρχονται και σφάλματα που περιέχουν τα διαθέσιμα δεδομένα και επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Τα σφάλματα αυτά, σε συνδυασμό με την ύπαρξη περισσότερων από έναν σημαντικών κλάδων υδρογραφικού δικτύου, αλλοιώνουν την κλασική «καμπανοειδή» μορφή των μοναδιαίων υδρογραφημάτων. Για την διόρθωση τους, ώστε να ομαλοποιηθούν, απαιτείται βελτιστοποίηση, κυρίως στον καθοδικό κλάδο, διατηρώντας ωστόσο τον συνολικό όγκο απορροής σταθερό.

Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζουν ωστόσο ιδιαίτερο ενδιαφέρον, και με κατάλληλες τροποποιήσεις μπορούν να βελτιώσουν τα αποτελέσματα τους.

Τα ΜΥΓ που προέκυψαν με τις παραπάνω μεθόδους, συγκρίθηκαν με διαθέσιμα ΜΥΓ που έχουν προκύψει από επεξεργασία ταυτόχρονων παρατηρήσεων βροχής – απορροής.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων με το υπολογισμένο ΜΥΓ έδειξε ότι η χρησιμοποίηση των μεθόδων αυτών αντενδείκνυται. Ούτως ή άλλως η εφαρμογή τους σε λεκάνες απορροής του μεγέθους που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν έχει και πραγματικό ενδιαφέρον, ούτε για την διαστασιολόγηση τεχνικών έργων αλλά ούτε και για την διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής. Οι μέθοδοι αυτές, είναι κατάλληλες για πολύ μικρότερες εκτάσεις. Αν υπάρχει ενδιαφέρον για την εξαγωγή υδρολογικής πληροφορίας σε μια παρόμοια με αυτές που εξετάστηκαν λεκάνη, θα πρέπει να προηγηθεί ο διαχωρισμός της σε υπολεκάνες και το αποτέλεσμα να προκύψει και με την χρήση μεθόδων διόδευσης.

## 6.2 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή μεθόδων υπολογισμού μοναδιαίου υδρογραφήματος (MYG) σε τρεις λεκάνες απορροής της Κεντρικής Ελλάδας έδειξε, ως γενική εικόνα, σημαντική ανομοιομορφία μεταξύ των αποτελεσμάτων των επιμέρους μεθόδων και απόκλιση αυτών από τα υπολογισμένα MYG βάσει ζευγών βροχής-απορροής (στο εξής 'MYG (βρ-απ)').

Απο τα αποτελέσματα εξάγεται ένα πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα, το οποίο βασίζεται στην ανομοιομορφία των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων που προέκυψαν από μεθόδους που χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ελλάδα αλλά και παγκοσμίως. Η ανομοιομορφία αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τους ερευνητές. Η επιλογή μεθόδου για την εξαγωγή υδρολογικής πληροφορίας θα πρέπει να γίνεται βάση του σκοπού της μελέτης, αλλά και της αναπόφευκτης, μιας και οι θέσεις μετρήσεων παροχών είναι ελάχιστες στον Ελλαδικό χώρο, αβεβαιότητας που εισάγουν οι μέθοδοι συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων στα αποτελέσματα.

Στις λεκάνες απορροής Αλή Εφέντη και Πορταϊκού, τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα αδυνατούν να προσομοιώσουν σε ικανοποιητικό βαθμό την μορφή της απορροής των υπολογισμένων MYG όπως έδειξαν και οι τιμές του δείκτη Nash-Sutcliffe *Ef*. Επίσης, υπερεκτιμήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις η τιμή της παροχής αιχμής. Ακόμα, ο χρόνος βάσης στην λεκάνη απορροής του Αλή Εφέντη υποεκτιμήθηκε από τις μεθόδους, όχι ωστόσο στο βαθμό που παρατηρήθηκε στον Πορταϊκό ποταμό, στον οποίο το υπολογισμένο MYG έχει πολύ μεγάλο χρόνο βάσης.

Όσο αφορά την λεκάνη απορροής του Βενέτικου τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των μεθόδων δείχνουν να προσομοιώνουν καλύτερα το υπολογισμένο MYG, καθώς τρεις μέθοδοι λαμβάνουν θετική τιμή στον δείκτη Nash-Sutcliffe-*Ef*. Ένα ενδιαφέρον στοιχείο για αυτήν την λεκάνη είναι ότι η παροχή αιχμής, εκτός της μεθόδου του στιγμιαίου μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά Clark, δεν υπερεκτιμάται, αντίθετα υποεκτιμάται με την χρήση των μεθόδων κατάρτισης συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων, κάτι που δεν παρατηρήθηκε σε καμία περίπτωση στις λεκάνες Αλή Εφέντη και Πορταϊκού. Ένας αναλυτικότερος σχολιασμός με παράθεση ενδεικτικών τιμών των αποτελεσμάτων γίνεται παρακάτω.

### 1. Λεκάνη απορροής Αλή Εφέντη

Από την εφαρμογή των μεθόδων προέκυψαν τα εξής:

- Η μέγιστη παροχή αιχμής προέκυψε από την μέθοδο IUH Clark, 582.13 m<sup>3</sup>/s, η οποία είναι παρεμφερής με αυτήν της μεθόδου Snyder 554.80 m<sup>3</sup>/s. Η μικρότερη τιμή για την παροχή αιχμής δόθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου SCS, 272.00 m<sup>3</sup>/s.
- Ο συνολικός όγκος απορροής υπολογίστηκε ίδιος σε όλες τις μεθόδους, εκτός της μεθόδου Sierra Nevada, η ασυμφωνία αυτή οφείλεται στην διαδικασία ομαλοποίησης της αθροιστικής καμπύλης S, ωστόσο δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα διότι αφορούν τον καθοδικό κλάδο, το «σβήσιμο» της απορροής

- Ο μεγαλύτερος χρόνος βάσης προέκυψε με την μέθοδο της Sierra Nevada, αν εξαιρεθεί η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας η οποία δίνει ως αποτέλεσμα ένα τριγωνικό MYG και συμμετείχε στους υπολογισμούς καθαρά για λόγους πληρότητας
- Η χρονική στιγμή που παρατηρείται η αιχμή προέκυψε περίπου η ίδια για τις μεθόδους SCS, Ισόχρονες, Sierra Nevada, περίπου την εικοστή ώρα, ενώ η μέθοδος Snyder και η μέθοδος IUM Clark παρουσίασαν το χρόνο αιχμής την ένατη και την δωδέκατη ώρα αντίστοιχα, γεγονός που επαληθεύει τις υψηλές τιμές της παροχής αιχμής στις δύο τελευταίες μεθόδους.

Όσον αφορά την σύγκριση των μεθόδων με το MYG που προέκυψε από ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής – απορροής, το οποίο για λόγους συντομίας θα αναφέρεται ως MYG (βρ – απ), η εξαγωγή των συμπερασμάτων θα γίνει με την βοήθεια των δεικτών αποτελεσματικότητας που υπολογίστηκαν.

- Με την βοήθεια του δείκτη Nash-Sutcliffe  $E_f$ , προέκυψε ότι η μέθοδος της Sierra Nevada προσομοιώνει καλύτερα την χρονοσειρά του MYG (βρ – απ) καθώς η τιμή του δείκτη ήταν 0.26, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μεθόδους όπου ο δείκτης έλαβε αρνητικές τιμές.
- Η ποσοστιαία διαφορά του συνολικού όγκου απορροής των μεθόδων σε σύγκριση με τον συνολικό όγκο απορροής του MYG (βρ – απ) κυμαίνεται στο 2%, εκτός της μεθόδου κατά Sierra Nevada, για τον λόγο που αναφέρθηκε παραπάνω. Οι διαφορές αυτές, πιθανώς οφείλονται στην διαδικασία καθορισμού της λεκάνης απορροής, η οποία πραγματοποιήθηκε με την επεξεργασία ΨΜΕ μέσω της χρήσης λογισμικού ArcGIS. Η έκταση λεκάνη που χρησιμοποιήθηκε διαφέρει ελάχιστα με την έκταση της λεκάνη από την οποία είχε προκύψει το MYG (βρ – απ).
- Όσον αφορά τις τιμές της παροχής αιχμής, όλες οι μέθοδοι υπερεκτιμούν την τιμή της σε σχέση με το MYG (βρ – απ) σε σημαντικό βαθμό μάλιστα. Η καλύτερη εκτίμηση προέκυψε από την μέθοδο SCS η οποία παρουσιάζει την παροχή αιχμής αυξημένη κατά 79%. Οι χειρότερες εκτιμήσεις του μεγέθους, δίνονται από τις μεθόδους Snyder και IUM Clark, οι οποίες παρουσιάζουν την παροχή αιχμής αυξημένη κατά 266% και 284% αντίστοιχα.
- Η μέθοδος της SCS προσέγγισε περισσότερο την χρονική στιγμή της εμφάνισης της παροχής αιχμής με διαφορά μόλις μιας ώρας, ενώ η αμέσως καλύτερη εκτίμηση ήταν με την μέθοδο IUM Clark, με διαφορά ΔΤ δύο ώρες.

Από το παραπάνω στοιχεία, μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα, ότι για μια λεκάνη απορροής μεγάλου μεγέθους όπως αυτή του Αλή Εφέντη, με τις έντονες αλλαγές που παρατηρούνται στο ανάγλυφό της, καθώς αποτελείται από ένα ορεινό και ένα πεδινό τμήμα, οι μέθοδοι δεν προσέγγισαν ικανοποιητικά το MYG (βρ – απ). Η καλύτερη προσέγγιση από τις μεθόδους δόθηκε από την SCS, η οποία πλησίασε περισσότερο την τιμή της παροχής αιχμής αλλά και τον χρόνο αιχμής.

## 2. Λεκάνη απορροής Πορταϊκού

Από την εφαρμογή των μεθόδων προέκυψαν τα εξής:

- Η μέγιστη παροχή αιχμής προέκυψε από την μέθοδο IUH Clark, 107.39 m<sup>3</sup>/s, παρεμφερή με αυτήν της μεθόδου Ισόχρονων καμπυλών 90.18 m<sup>3</sup>/s. Η μικρότερη τιμή για την παροχή αιχμής δόθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου SCS, 37.80 m<sup>3</sup>/s.
- Ο συνολικός όγκος απορροής υπολογίστηκε ίδιος σε όλες τις μεθόδους.
- Ο μεγαλύτερος χρόνος βάσης προέκυψε με την μέθοδο της Sierra Nevada, αν εξαιρεθεί η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας η οποία δίνει ως αποτέλεσμα ένα τριγωνικό MYΓ και συμμετείχε στους υπολογισμούς καθαρά για λόγους πληρότητας
- Η χρονική στιγμή που παρατηρείται η αιχμή προέκυψε η ίδια για τις μεθόδους Snyder, Sierra Nevada, στις τέσσερις ώρες και για τις μεθόδους των Ισόχρονων καμπυλών και IUH Clark στις πέντε ώρες. Διαφοροποίηση παρουσίασε η μέθοδος SCS που εμφανίζει την παροχή αιχμής στις εφτά ώρες.

Όσον αφορά την σύγκριση των μεθόδων με το MYΓ που προέκυψε από ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής – απορροής η εξαγωγή των συμπερασμάτων θα γίνει με την βοήθεια των δεικτών αποτελεσματικότητας που υπολογίστηκαν.

- Με την βοήθεια του δείκτη Nash-Sutcliffe *E<sub>f</sub>*, διαπιστώνεται ότι καμία μέθοδο δεν προσομοιώνει ικανοποιητικά την χρονοσειρά του MYΓ (βρ – απ), διότι όλες λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Μια εξήγηση μπορεί να δοθεί από τον μεγάλο χρόνο βάσης του έχει το προαναφερμένο MYΓ, δηλαδή την καθυστέρηση της απορροής.
- Η ποσοστιαία διαφορά του συνολικού όγκου απορροής των μεθόδων σε σύγκριση με τον συνολικό όγκο απορροής του MYΓ (βρ – απ) κυμαίνεται στο 0.01%.
- Όσον αφορά τις τιμές της παροχής αιχμής, όλες οι μέθοδοι υπερεκτιμούν την τιμή της σε σχέση με το MYΓ (βρ – απ) σε σημαντικό βαθμό μάλιστα. Η καλύτερη εκτίμηση προέκυψε από την μέθοδο SCS η οποία παρουσιάζει την παροχή αιχμής αυξημένη κατά 158.9%. Οι χειρότερες εκτιμήσεις του μεγέθους, δίνονται από τις μεθόδους Ισόχρονων καμπυλών και IUH Clark, οι οποίες προέκυψαν από την επεξεργασία ΨΜΕ μέσω λογισμικού ΣΓΠ και παρουσιάζουν την παροχή αιχμής αυξημένη κατά 517% και 635% αντίστοιχα.
- Η μέθοδος της SCS προσέγγισε ακριβώς την χρονική στιγμή της εμφάνισης της παροχής αιχμής.

Από το παραπάνω στοιχεία, μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα, ότι για μια λεκάνη απορροής μεγάλου μικρού μεγέθους όπως αυτή του Πορταϊκού, έντονων κλίσεων, οι μέθοδοι δεν προσέγγισαν ικανοποιητικά το MYΓ (βρ – απ), ιδιαίτερα αυτών που προέκυψαν μέσω της επεξεργασίας ΨΜΕ.

Η καλύτερη προσέγγιση από τις μεθόδους δόθηκε από την SCS, η οποία πλησίασε περισσότερο την τιμή της παροχής αιχμής αλλά και τον χρόνο αιχμής.

### 3. Λεκάνη απορροής Βενέτικου

Από την εφαρμογή των μεθόδων προέκυψαν τα εξής:

- Η μέγιστη παροχή αιχμής προέκυψε από την μέθοδο IUH Clark, 342.87 m<sup>3</sup>/s,. Η μικρότερη τιμή για την παροχή αιχμής δόθηκε με την εφαρμογή της μεθόδου SCS, 115.50 m<sup>3</sup>/s. Οι μέθοδοι εκτός τις Sierra Nevada υποεκτιμούν την παροχή αιχμής.
- Ο συνολικός όγκος απορροής υπολογίστηκε περίπου ίδιος σε όλες τις μεθόδους με ελάχιστες διαφορές.
- Ο μεγαλύτερος χρόνος βάσης προέκυψε με την μέθοδο της Sierra Nevada, αν εξαιρεθεί η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας η οποία δίνει ως αποτέλεσμα ένα τριγωνικό ΜΥΓ και συμμετείχε στους υπολογισμούς καθαρά για λόγους πληρότητας
- Η χρονική στιγμή που παρατηρείται η αιχμή προέκυψε περίπου η ίδια για τις μεθόδους Snyder στις επτά ώρες και εννιά ώρες με την μέθοδο IUH Clark. Οι υπόλοιπες μέθοδοι έδωσαν τιμές μεγαλύτερες.

Όσον αφορά την σύγκριση των μεθόδων με το ΜΥΓ που προέκυψε από ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής – απορροής η εξαγωγή των συμπερασμάτων θα γίνει με την βοήθεια των δεικτών αποτελεσματικότητας που υπολογίστηκαν.

- Με την βοήθεια του δείκτη Nash-Sutcliffe *Ef*, παρατηρήθηκε ότι οι μέθοδοι Snyder, SCS και Sierra Nevada οι οποίες λαμβάνουν θετική τιμή. Οι μέθοδοι που έχουν προκύψει από την επεξεργασία του ΨΜΕ, και σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνουν αρνητικές τιμές. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον συγκεκριμένο δείκτη, η Sierra Nevada λαμβάνει την τιμή 0.94, κάτι που σημαίνει ότι προσομοιώνει πολύ καλά την χρονοσειρά και μάλιστα χωρίς βαθμονόμηση.
- Η ποσοστιαία διαφορά του συνολικού όγκου απορροής των μεθόδων σε σύγκριση με τον συνολικό όγκο απορροής του ΜΥΓ (βρ – απ) κυμαίνεται στο 4%.
- Όσον αφορά τις τιμές της παροχής αιχμής, όλες οι μέθοδοι εκτός του Snyder, υποεκτιμούν την τιμή της σε σχέση με το ΜΥΓ (βρ – απ), ωστόσο οι τιμές του δείκτη είναι μικρότερες από την τιμή στις άλλες λεκάνες. Η καλύτερη εκτίμηση προέκυψε από την μέθοδο IUH Clark η οποία παρουσιάζει την παροχή αιχμής αυξημένη κατά 13.53%. Η χειρότερη εκτίμηση του μεγέθους, προκύπτει από την μέθοδο της SCS και της Sierra Nevada.
- Η μέθοδος Snyder προσέγγισε ακριβώς την χρονική στιγμή της εμφάνισης της παροχής αιχμής. Από το παραπάνω στοιχεία, μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα, ότι για μια λεκάνη απορροής μεσαίου μεγέθους οι χρονοσειρές της απορροής προσομοιώνουν καλύτερα την χρονοσειρά του ΜΥΓ (απ – βρ), ενώ οι διαφορές στην παροχή αιχμή είναι μικρότερες σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δύο άλλων περιοχών που περιλαμβάνονται στην μελέτη.

### 6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ο υπολογισμός πλημμυρογραφημάτων είναι ιδιαίτερα χρήσιμος σε πολύ μικρότερης έκτασης λεκάνες σε σύγκριση με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν. Ο διαμερισμός των τριών περιοχών μελέτης σε



υπολεκάνες και εφαρμογή των μεθόδων για κάθε μια από αυτές, σε συνδυασμό με την διόδευση, είτε υδρολογική, είτε υδραυλική, των πλημμυρογραφημάτων κάθε μια εξ αυτών μέχρι το σημείο εξόδου όπου υπάρχουν δεδομένα απορροής, θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρον και θα αποδείκνυε αν, στο σημείο εξόδου τουλάχιστον που μπορούμε να επαληθεύσουμε, οι διάφορες μέθοδοι ανταποκρίνονται καλύτερα.

Μια άλλη πρόταση είναι η εφαρμογή των μεθόδων σε ακόμα περισσότερες λεκάνες απορροής του Ελλαδικού χώρου με διαθέσιμες μετρήσεις παροχής. Η συσχέτιση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν, αναφορικά με τα τοπογραφικά, μορφολογικά, εδαφολογικά, ή/και γεωλογικά χαρακτηριστικά της κάθε λεκάνης απορροής μπορούν να οδηγήσουν σε συμπεράσματα για το ποιά μέθοδος είναι κατά περίπτωση κατάλληλη για τον προσδιορισμό των μοναδιαίων υδρογραφημάτων σε λεκάνες απορροής που δεν υπάρχουν μετρήσεις, στις οποίες ωστόσο είναι εύκολο να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά τους.

Επίσης προτείνεται η σύγκριση της εφαρμογής των μεθόδων κατάρτισης συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων με χρήση λογισμικού ΣΓΠ σε ΨΜΕ με διαφορετική χωρική ανάλυση ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση της ακρίβειας των πρωτογενών δεδομένων στα αποτελέσματα.

Τέλος, προτείνεται να αξιολογηθεί η καταλληλότητα εφαρμογής των μεθόδων, συγκρίνοντάς τα απευθείας με διαθέσιμα δεδομένα βροχής-απορροής, όπου, χρησιμοποιώντας τα συνθετικά ΜΥΓ που υπολογίστηκαν σε συνδυασμό με τα υετογράμματα, να καταρτιστούν πλημμυρογραφήματα και στην συνέχεια να αξιολογηθούν βάση των παρατηρημένων. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφεται και η αβεβαιότητα των ΜΥΓ που προέκυψαν από ταυτόχρονες παρατηρήσεις βροχής – απορροής.

# Αναφορές

---

## Στην ελληνική γλώσσα

- Καββαδά. Όλγα., Ανάλυση μεθόδων βροχής – απορροής σε υδρολογικά μοντέλα με χρήση ΣΓΠ, ΔΠΜΣ Περιβάλλον και Ανάπτυξη, 2012
- Κουτσογιάννης, Δ., Μαμάσης Ν., και Ευστρατιάδης Α., «Υδρολογική μελέτη λεκάνης Σπερχειού», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιανουάριος 2003
- Μαμάσης Ν., Διαφάνειες μαθήματος Προχωρημένη Υδρολογία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2010.
- Μιμίκου, Μ. Α. και Ε. Α. Μπαλτάς 2006. Τεχνική υδρολογία. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Μπαλτάς, Ε. (1996) Εκτίμηση και πρόγνωση καταιγίδων και πλημμυρών με χρήση μετεωρολογικού ραντάρ. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα
- Παπαλέξης, Γ. (2012) Μοντέλα προσδιορισμού πλημμυρογραφημάτων. Μεταπτυχιακή Διατριβή, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
- Παπαμιχαήλ, Δ.Μ., Γεωργίου, Π.Ε. και Καραμούζης, Δ. Ν., 2001. Εκτίμηση των Πλημμυρογραφημάτων της Ραγδαίας Βροχόπτωσης της 7-8 Οκτωβρίου 2000 στην
- Περιοχή της Μεγάλης Παναγιάς Χαλκιδικής. Υδροτεχνικά, Τόμ. 11, 47-60 σελ.
- Τσακίρης Γ., Τεχνική υδρολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1995.

## Ξενόγλωσσες

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

- Clark, C.O. (1945). Storage and the Unit Hydrograph. Transactions of the American Society of Civil Engineers 110, pp 1419-1446
- Linsley, R., Kohler, M. and Paulhus J., Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, 1949
- SCS (Soil Conservation Service), 1972. National Engineering Handbook. Section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington, DC
- Sherman, L.K., 1949. The unit hydrograph method in: hydrology (Mainzer, O.Editor). Dover Publications, New York, 514-526 pp
- Sutcliffe J.V., Methods of Flood Estimation, A Guide to Flood Studies Report, Report No 49, Institute of Hydrology, UK, 1978
- Tsakiris, G., Agrafiotis, G., & Kiountouzis, E. (1988). A shot noise model for the generation of soil moisture data. Stochastic Hydrology and Hydraulics, 2(1), 51-59.
- US Department of the Interior (USDI) Bureau of Reclamation, 1987. Design of Small Dams 3rd Edition, US Government Printing Office
- Wanielista M., Stormwater Management Quantity and Quality, Ann Arbor, 1978
  
- **Διαδικτυακές πηγές**
- [www.ktimatologio.gr](http://www.ktimatologio.gr)
- [www.geodata.gov.gr](http://www.geodata.gov.gr)