

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**



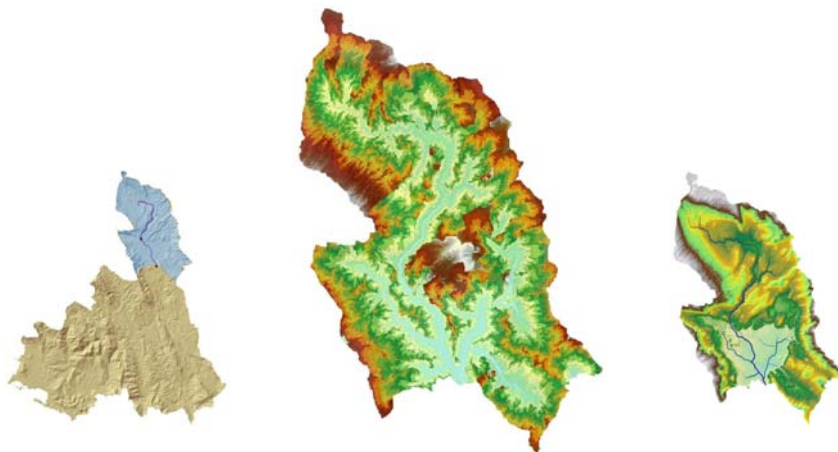
**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**“ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**



**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΡΟΧΗΣ - ΑΠΟΡΡΟΗΣ  
ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ  
(GIS)**



*Αντώνιος Δ. Χριστοφίδης*  
*Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Μ.Π.*

**Αθήνα, Ιούνιος 2008**

**Επιβλέπων: Λέκτορας Ν. Μαμάσης**

**“ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»**

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα, στο σημείο αυτό, να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν για την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και εν γένει της παρουσίας μου στο ΔΜΠΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων».

Ευχαριστώ πολύ τον αξιότιμο κ. Ν. Μαμάση, Λέκτορα στο ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του οποίου έγινε η εργασία αυτή. Η επιλογή του θέματος, οι πολύτιμες συμβουλές του και η εν γένει σοβαρή καθοδήγηση του ήταν πολύτιμες. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ι. Παναγόπουλο για την βοήθεια του κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Επίσης, θέλω ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου στο μεταπτυχιακό, καθώς το άριστο κλίμα που δημιούργησαν, τόσο κατά την διάρκεια των σπουδαστικών υποχρεώσεων όσο και εκτός αυτών, έδωσαν επιπλέον νόημα στην φοίτηση του μεταπτυχιακού προγράμματος, πέρα από το γνωστικό αντικείμενο.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στην οικογένειά μου και τον κ. Κ. Μπέκα, Δ/ντή Ανάπτυξης ΜΥΗΕ της Εταιρίας ΡΟΚΑΣ, για την αμέριστη κατανόηση τους κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Κλείνοντας, αφιερώνω την εργασία αυτή στην Ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με την ευχή να ξεπεραστούν τα γραφειοκρατικά εμπόδια και η πολεμική εναντίον των ΑΠΕ, που εμποδίζουν την ανάπτυξη τους στην Ελλάδα μας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>7</b>
1.1 Γενικά.....	7
1.2 Κατηγορίες Υδρολογικών μοντέλων.....	8
1.2.1 Χωρική κλίμακα.....	8
1.2.2 Χρονική Κλίμακα.....	9
1.2.3 Στοχαστική δομή των μεταβλητών του μοντέλου.....	9
1.2.4 Βαθμός προσέγγισης των φυσικών διεργασιών.....	9
1.3 Μοναδιαίο υδρογράφημα.....	10
1.4 Υδρολογικά μοντέλα σε Σ.Γ.Π. (G.I.S) .....	13
1.5 Αντιπλημμυρικά έργα.....	14
1.6 Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας.....	15
1.7 Πρωτότυπα σημεία.....	15
1.8 Διάρθρωση της εργασίας.....	16
<b>2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ Σ.Γ.Π. (G.I.S.)</b> .....	<b>17</b>
2.1 Γενικά χαρακτηριστικά των Σ.Γ.Π. ....	17
2.1.1 Κανονικοποιημένα μοντέλα ή μωσαϊκά.....	18
2.2 Υδρολογικά μοντέλα σε Σ.Γ.Π. ....	19
2.3 Μέθοδος χρόνου - επιφάνειας.....	21
2.4 Ανάπτυξη ιστογράμματος χρόνου - επιφάνειας. ....	22
2.4.1 Σχηματισμός υδρογραφικού δικτύου.....	22
2.4.2 Προσδιορισμός ταχυτήτων ροής.....	25
2.4.3 Υπολογισμός ιστογράμματος χρόνου – επιφάνειας.....	26
<b>3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ</b> .....	<b>27</b>
3.1 Γεωγραφική θέση ποταμού Καλαμά.....	27
3.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία λεκάνης ποταμού Καλαμά.....	29

3.3	Χρήσεις γης στην λεκάνη του Καλαμά.....	32
3.4	Χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής της Αρετής.....	32
3.4.1	Γεωμετρία.....	33
3.4.2	Ανάγλυφο.....	36
3.4.3	Υδρογραφικό δίκτυο.....	37
3.4.4	Χρήσεις γης.....	39
3.4.5	Γεωλογία .....	41
3.4.5.1	Καρστικά συστήματα λεκάνης Αρετής.....	41
<b>4</b>	<b>ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΟΗΣ .....</b>	<b>43</b>
4.1	Προσδιορισμός παροχών.....	43
4.2	Ταχύτητα επιφανειακής - χερσαίας ροής .....	46
4.3	Ταχύτητα ροής υδρογραφικού δικτύου.....	51
4.3.1	Μεθοδολογία υπολογισμού ταχύτητας ροής Υδρογραφικού Δικτύου... ..	51
4.3.2	Δημιουργία μοντέλου υπολογισμού βάθους ροής υδρογραφικού δικτύου.....	52
4.3.3	Διόρθωση μοντέλου στις περιοχές με μηδενική κλίση.....	57
4.4	Σφάλματα από παραδοχές & απλοποιήσεις.....	58
<b>5</b>	<b>ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΒΡΟΧΗΣ.....</b>	<b>60</b>
5.1	Δεδομένα.....	60
5.2	Επεισόδια βροχής – απορροής.....	61
5.3	Τρόπος εκτίμηση ενεργού βροχόπτωσης.....	63
<b>6</b>	<b>ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ &amp; ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>66</b>
6.1	Εκτέλεση μοντέλου.....	66
6.2	Ρύθμιση μοντέλου - αποτελέσματα.....	67
6.3	Υπολογισμός συνθετικών υδρογραφημάτων.....	71
6.4	Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων.....	75
6.5	Ανάλυση ευαισθησίας.....	79
6.5.1	Επίδραση μήκους τομής υδρογραφικού δικτύου.....	79
6.5.2	Επίδραση του ύψους βροχής P.....	81
6.5.3	Επίδραση χρόνου συρροής $t_c$ .....	82
6.5.4	Επίδραση συντελεστή $\alpha$ .....	84

6.5.5	Επίδραση την ένταση βροχόπτωσης i.....	85
<b>7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ &amp; ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>87</b>
7.1	Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις.....	87
7.2	Προτάσεις.....	88
<b>8</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>90</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>94</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου που να προσομοιώνει την φύση είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα, με αμφίβολα αποτελέσματα. Η ανάπτυξη ενός φυσικού υδρολογικού μοντέλου δεν μπορεί να γίνει έστω κι αν θεωρηθεί ότι υπάρχει πλήρης γνώση των φυσικών νόμων και φαινομένων που διέπουν τον υδρολογικό κύκλο, κάτι που δεν ισχύει. Αυτό, γιατί δεν υπάρχει πλήρης γνώση της υφιστάμενης κατάστασης. Αντιθέτως, θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι τα διαθέσιμα δεδομένα είναι ελάχιστα έως ανεπαρκή. Συνεπώς, η ακρίβεια του μοντέλου και η επιλογή των παραδοχών που γίνονται, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα διαθέσιμα δεδομένα (ποσότητα και ποιότητα).

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα νέο κατανεμημένο εννοιολογικό μοντέλο βροχής - απορροής, όπου προσομοιώνει μεμονωμένα υδρολογικά γεγονότα, και συγκεκριμένα τα υδρογραφήματα. Το μοντέλο αυτό είναι προσδιοριστικό γιατί δεν εισάγεται στην διαδικασία η στοχαστικότητα των μεταβλητών που χρησιμοποιεί. Κύριος στόχος του μοντέλου είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής και κατά δεύτερο λόγο η εκτίμηση του χρόνου ανόδου (ή χρόνου αιχμής). Προσδιορίζει το ιστογράμμα χρόνου – επιφάνειας της λεκάνης απορροής, από το οποίο προκύπτει το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης. Η όλη διαδικασία προσδιορισμού του ιστογράμματος χρόνου – επιφάνειας εφαρμόζεται αποκλειστικά σε περιβάλλον G.I.S. Προέκυψε με τροποποίηση υπαρχόντων μοντέλων βροχής – απορροής, εισάγοντας νέες τεχνικές (νέους εμπειρικούς τύπους). Αναπτύχθηκε έτσι ώστε να μπορεί να εκτελείται α) σε λεκάνες με μη διαθέσιμα υδρολογικά δεδομένα & β) χωρίς να χρησιμοποιεί πολύπλοκες μακροεντολές που αυξάνουν τον χρόνο εκτέλεσης του.

Για τον προσδιορισμό του ιστογράμματος χρόνου επιφάνειας είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των ταχυτήτων ροής στην υπό μελέτη λεκάνη. Οι ταχύτητες που υπολογίζονται είναι δύο ειδών: ταχύτητες χερσαίας ροής και ταχύτητες υδρογραφικού δικτύου. Αφού υπολογιστούν οι κλίσεις ταχυτήτων των δύο ειδών ροής, συνδυάζονται ώστε να προκύψει ο τελικός κλίση ταχυτήτων ροής

Όσον αφορά την ταχύτητα χερσαίας ροής, ο υπολογισμός έγινε με βάση τον συνδυασμό της μεθόδου κινηματικού κύματος με την εξίσωση Manning. Το βάθος ροής σε κατάσταση ισορροπίας συνδυάζεται με τη εξίσωση Manning και υπολογίζεται η ταχύτητα χερσαίας ροής από τη παρακάτω εξίσωση.

$$V_o = \frac{(i_e x)^{0.4} S_o^{0.3}}{n^{0.6}}$$

Στην εξίσωση εισάγεται η ένταση της ενεργού βροχόπτωσης και η τιμή της προέκυψε από την διαδικασία της ρύθμισης ( $i_e = 5 \text{ mm/h}$ ). Για την διαδικασία αυτή χρειάζεται, επίσης, ένας κλίση με τις τραχύτητες των εδαφών. Οι τραχύτητες επιλέχθηκαν ανάλογα τις χρήσεις γης σύμφωνα με εύλογες παραδοχές. Το μήκος ροής  $x$  και η κλίση  $S$  προκύπτουν από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ).

Για τον υπολογισμό των ταχυτήτων ροής υδατορρεύματος αρχικά προσδιορίστηκαν οι μέσες παροχές για κάθε φατνίο του υδρογραφικού δικτύου με την εξίσωση:

$$Q_i = \frac{V_i}{t_{ci}} = \frac{P_e \times A_i}{t_{ci}}$$

Όπου ο χρόνος συρροής  $t_{ci}$  υπολογίζεται από την εξίσωση

$$t_{ci} = t_c \left( \frac{A_i}{A_{\text{ΛΕΚ}}} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad \text{με } \alpha \geq 1$$

Η ενεργός βροχόπτωση επιλέχθηκε  $P_e = 10 \text{ mm}$ , και οι επιφάνειες  $A_{\text{ΛΕΚ}}$  και  $A_i$  (= επιφάνεια που απορρέει στο φατνίο  $i$ ) υπολογίζονται από το ΨΜΕ. Ο συντελεστή  $\alpha$  έλαβε την τιμή 1 κατά την διαδικασία της ρύθμισης και ομοίως, κατά τη ίδια διαδικασία, ο χρόνος συρροής έλαβε την τιμή  $t_c = 15 \text{ h}$ .

Ύστερα, προσομοιώνεται η ροή του υδρογραφικού δικτύου με κανάλι τραπεζοειδούς διατομής με πλάτος  $b = 2 \text{ m}$  και πλευρικές κλίσεις  $z = 1,75$  (Ο:Κ = 1,75:1) και τραχύτητας Manning  $n = 0,05$ . Για τον υπολογισμό του ομοιόμορφου βάθους ροής του κάθε φατνίου αναπτύχθηκε η παρακάτω εμπειρική εξίσωση όπου το  $y_0$  προκύπτει από την παροχή  $Q$  και την κλίση  $S$ . Με την εξίσωση αυτή αποφεύγεται ο προσδιορισμός του  $y_0$  με επαναληπτικές διαδικασίες διαδοχικών προσεγγίσεων.

$$y_0 = \left( \frac{S}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}},$$

$$\text{με } \alpha = 200 \times 10^{-6} \times Q^{2,1481}$$

$$\& \beta = 3,3727 \times Q^{0,065}$$

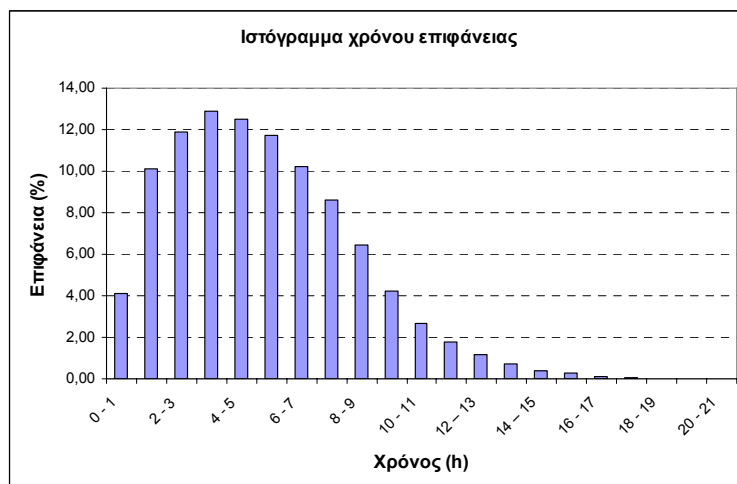
Με δεδομένο το βάθος ροής  $y_0$ , την παροχή  $Q$  και την γεωμετρία καναλιού προκύπτει η ταχύτητα από την εξίσωση:

$$V = \frac{Q}{E} = \frac{Q}{(by + zy^2)}$$

Η ταχύτητα που προκύπτει είναι διαφορετική για κάθε φατνίο υδρογραφικού δικτύου αφού το κάθε φατνίο έχει διαφορετική παροχή Q και κλίση S.

Στο τέλος, συνδυάζονται οι κλίσεις ταχυτήτων υδρογραφικού δικτύου και χερσαίας ροής, και προκύπτει το ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας.

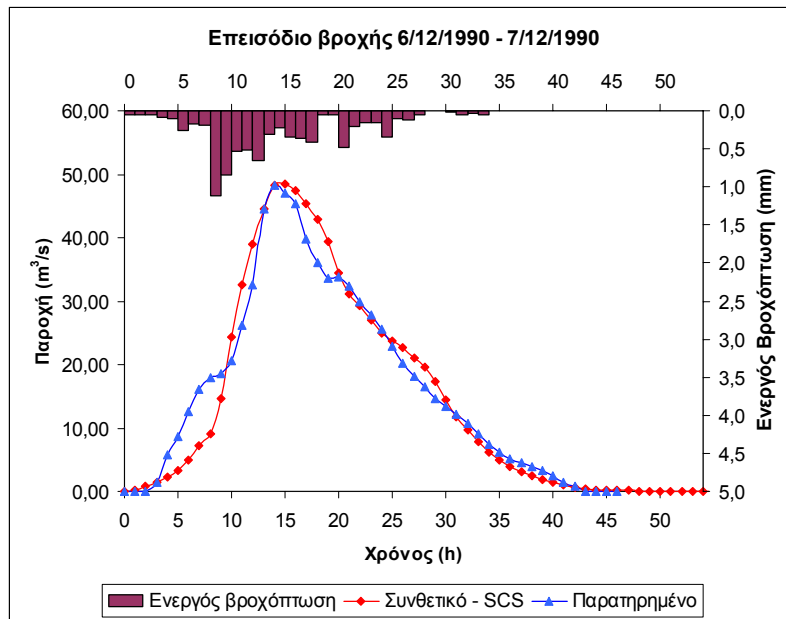
Η παραπάνω διαδικασία αυτοματοποιήθηκε μέσα σε περιβάλλον GIS και εκτελέστηκε για την υπολεκάνη της Αρετής (γέφυρα Αρετής) του ποταμού Καλαμά, ποταμού της Περιφέρειας της Ηπείρου. Χρησιμοποιήθηκε Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους ισοδιάστασης 50 m. Για τον σχηματισμό του υδρογραφικού δικτύου επιλέχθηκε τιμή - κατώφλι 2500 φατνίων από την διαδικασία της ρύθμισης. Προέκυψε το παρακάτω ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας (Σχήμα 1) με χρονικό βήμα 1 h.



**Σχήμα 1** Ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας

Από το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας και βάσει της αρχής της επαλληλίας, δημιουργήθηκαν συνθετικά πλημμυρογραφήματα για 4 επεισόδια βροχής απορροής. Τα ενεργά υετογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των πλημμυρογραφημάτων προέκυψαν από δεδομένα βροχομετρικών σταθμών κατόπιν επεξεργασίας με τη μέθοδο SCS. Η επιφανειακή ολοκλήρωση της βροχόπτωσης, στο επεισόδιο όπου υπήρχαν δεδομένα από δύο σταθμούς έγινε με την μέθοδο των πολυγώνων Thiessen. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το επεισόδιο στις 6/12/1990-7/12/1990 στο οποίο το συνθετικό υδρογράφημα προσομοίωσε καλύτερα το παρατηρημένο υδρογράφημα. Από το παρατηρημένο υδρογράφημα έχει αφαιρεθεί η βασική απορροή.





**Σχήμα 2 Επεισόδιο βροχής 6/12/1990 – 7/12/1990**

Ακολούθησε στατιστική ανάλυση των εκτιμημένων τιμών της αιχμής, με τον συντελεστή σφάλματος και το μέσο συντελεστή σφάλματος (ΜΣΦ), βάση της οποίας έγινε η ρύθμιση και η επαλήθευση του μοντέλου. Επίσης έγινε στατιστική ανάλυση των χρόνων αιχμής καθώς και της μορφής του υδρογραφικού δικτύου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αιχμές των συνθετικών υδρογραφημάτων προσέγγισαν με μεγάλη επιτυχία τις παρατηρημένες αιχμές σε όλα τα επεισόδια βροχής – απορροής (η μέση τιμή του σχετικού σφάλματος για όλα τα επεισόδια έλαβε την τιμή  $ΜΣΦ = 0,085$ ). Εντούτοις, οι χρόνοι αιχμής και η μορφή των υδρογραφημάτων προσεγγίστικαν με ικανοποιητική ακρίβεια μόνο στα μισά επεισόδια.

Η ανάλυση ευαισθησίας που διενεργήθηκε έδειξε ότι το μήκος ροής του υδρογραφικού δικτύου και η ένταση της βροχής που λαμβάνει μέρος στο υπολογισμό της χερσαίας ροής επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελέσματα, σε σχέση με άλλους συντελεστές που εξετάστηκαν.

Συμπερασματικά, το νέο μοντέλο βροχής απορροής που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον GIS εκτίμησε με μεγάλη ακρίβεια τις παροχές των αιχμών της πλημμύρας και για τα τεσσера επεισόδια βροχής απορροής που εξετάστηκαν. Το πρωτότυπο σημείο του είναι ο αυτόματος υπολογισμός των ταχυτήτων ροής υδρογραφικού δικτύου αποκλειστικά μέσα σε περιβάλλον GIS. Παρά, όμως, τα θετικά αποτελέσματα του μοντέλου, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η ποιότητα και η ακρίβεια των αρχικών δεδομένων βροχής – απορροής (βροχοπτώσεις και υδρομετρήσεις) καθώς και οι μέθοδοι επεξεργασίας του (όπως η μέθοδος SCS) καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό το τελικό σφάλμα των αποτελεσμάτων.

# **DEVELOPMENT OF A GIS-BASED RAINFALL-RUNOFF MODEL**

By Antonios Christofidis

## **(ABSTRACT)**

In this study is developed a new distributed physically-based rainfall-runoff parameter model, which predicts direct runoff hydrographs. The overall goal of this study is to develop a method of estimating the values of peak flow rate and time to peak, and to create a unit hydrograph, based exclusively on the GIS.

The basic modeling approach was to use the raster GIS functions of ArcGIS to calculate the travel time from each point in the watershed to the outlet by determining the flow path and the travel time through each cell along the path. The travel time through each individual cell along the flow path was summed to estimate the cumulative travel time to the outlet. The model accounts for differences in overland and channel velocity, slope, and land use. Runoff is routed over the elevation surface. The total travel time to the outlet from each grid cell is estimated based on the runoff pathway and the travel time through each grid cell along the path.

The model uses the time-area curve method to calculate synthetic unit hydrograph. Once the cumulative travel time to the outlet is determined for each grid cell, the watershed is divided into 1-hour isochrones. After the watershed is divided into isochrones, a time-area histogram is developed. Then, a unit hydrograph is developed. The unit hydrograph ordinates at each time interval is the incremental area for that time step divided by the time interval.

The flow velocity is divided into overland flow velocity and channel flow velocity. The runoff velocity for areas with overland flow can be estimated by using a kinematic wave approximation combined with Manning equation. This calculation is based on the digital elevation model, the landuse and the calibration process. The land use data for the watershed was used to estimate the Manning's roughness coefficient for the overland cells. In other hand, the channels in the watershed were assumed to be trapezoidal with 1.75:1 side slopes and 2m bottom. An equation was developed to calculate the mean channel flow rate for each cell and another one was developed to estimate the equilibrium depth of flow. The channel flow is calculated using the flow rate and the equilibrium depth of flow for each cell, as well as the geometry of the channel.

The model was applied to the sub-basin Areti (bridge Areti) of the basin of river Kalamas. The layer's resolution was 50 m. This means that the cell's size was 250 m<sup>2</sup>. The land use data for the basin Areti was used to estimate the Manning's roughness coefficient for the overland cells. Due to the fact that many published tables of Manning's roughness coefficients do not include most of the specific land uses found in basin Areti, a number of assumptions were made to estimate values.

The estimated synthetic unit hydrograph was used to create synthetic hydrographs for 4 rainfall episodes. The unit hydrograph combined with the excess rainfall for each episode, which was estimated using the SCS method.

The peak flow rate from the synthetic hydrographs was compared with the observed hydrographs, using mainly the relative error and the mean arithmetic relative error (MARE). According to the MARE for the total of the episodes, the model predicted the peak flow rate with grate accuracy (MARE = 0,085). However, the time to peak was predicted successfully only for the half of the episodes.

At the end, the sensitivity analysis concluded that the length of the stream network and the intensity of the rainfall (which was used to calculate the overland flow) are the most important parameters for a successful calibration. In addition, a better evaluation for the new model needs more rainfall – runoff data from a watershed which have to be more accurate, too.

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Γενικά

Μια από τις μεγαλύτερες φιλοδοξίες του ανθρώπου ήταν πάντα να ελέγξει την φύση. Κι αν αυτό το κατάφερε επιτυχώς σε μεγάλη κλίμακα στην γλωρίδα και την πανίδα. Δεν συνέβη, όμως, το ίδιο και με τα καιρικά φαινόμενα. Αυτά παραμένουν ακόμα μακριά από τον έλεγχο του ανθρώπου. Ξέροντας, όμως, την αδυναμία του αυτή ο άνθρωπος, προσπάθησε να αναπτύξει τρόπους που να προβλέπουν την συμπεριφορά τους, ώστε να προφυλάσσεται από αυτά, λαμβάνοντας εγκαίρως τα απαραίτητα μέτρα. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας είναι και η δημιουργία κατασκευών που θα παραμένουν λειτουργικές και χρήσιμες, παρά τα όποια μετεωρολογικά φαινόμενα.

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

## 1.2 Κατηγορίες Υδρολογικών μοντέλων<sup>1</sup>

Ως Υδρολογικό μοντέλο ορίζεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς και απόκρισης ενός φυσικού συστήματος από ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών. Χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς με στόχο την ποσοτική εκτίμηση υδρολογικών μεταβλητών που είναι πρακτικά αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο.

Τα υδρολογικά μοντέλα διακρίνονται με βάση τη χωρική κλίμακα, τη χρονική κλίμακα, την στοχαστική ή όχι δομή των μεταβλητών του μοντέλου και το βαθμό προσέγγισης των φυσικών διεργασιών. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι εν λόγω κατηγορίες:

### 1.2.1 Χωρική κλίμακα

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

---

<sup>1</sup> Μαμασης Ν. Παρουσίαση Μαθήματος «Προχωρημένη Υδρολογία», 2007, Ευθυμίου, 2007

### 1.2.2 Χρονική Κλίμακα

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

### 1.2.3 Στοχαστική δομή των μεταβλητών του μοντέλου

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

### 1.2.4 Βαθμός προσέγγισης των φυσικών διεργασιών

- Μοντέλα φυσικής βάσης: Χρησιμοποιούν εξισώσεις μικροκλίμακας, που διέπουν το φυσικό φαινόμενο. Είναι θεωρητικά πλήρη σε πολύ μικρή (έως απειροστή) χωρική κλίμακα αλλά παρουσιάζουν αδυναμία σε μεγαλύτερες. Επίσης, παρουσιάζουν αδυναμία σε σχέση με άλλα, θεωρητικά λιγότερο πλήρη μοντέλα, λόγω της απαίτησής τους για μεγάλο όγκο δυσεύρετων δεδομένων καθώς πολλές μεταβλητές που περιέχουν απαιτούν δεδομένα που είναι αδύνατο να μετρηθούν στο πεδίο.
- Εννοιολογικά μοντέλα: Προσομοιώνουν τις κύριες διαδικασίες του φυσικού συστήματος βασιζόμενα σε απλουστευμένες παραδοχές. Η φυσική συνέπεια είναι σχετική, εφόσον οι παράμετροι θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές των «μακροσκοπικών» χαρακτηριστικών της λεκάνης.
- Εμπειρικά ή μαύρου κουτιού: Χρησιμοποιούν εξισώσεις χωρίς φυσική σημασία με αποτέλεσμα να μην υπάρχει καμία φυσική συνέπεια.

### ***1.3 Μοναδιαίο υδρογράφημα<sup>2</sup>***

Το μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να αποτελεί βάση για την διαδικασία εκτίμησης τόσο της πλημμυρικής αιχμής όσο και της εν γένει κατανομής που προκαλεί η βροχή. Εισήχθη πρώτα από τον Sherman (1932), ο οποίος έδωσε και τον εξής ορισμό: Το Μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους ίσου με τη μονάδα (στο μετρικό σύστημα ίσης με ένα cm), που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σ' όλη την έκτασή της υδρολογική λεκάνης κι έχει ομοιόμορφη ένταση. Δηλαδή το μοναδιαίο υδρογράφημα απορροής είναι ένα υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή ίση με 10 mm συγκεκριμένης διάρκειας.

Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

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

Κατά τον Wilson (1990), οι παραπάνω προϋποθέσεις μόνο κατά προσέγγιση ικανοποιούνται από τις φυσικές υδρολογικές λεκάνες. Το πρώτο κριτήριο δεν είναι απόλυτα ορθό καθώς αγνοεί την αποθηκευτική ικανότητα των ρευμάτων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της βροχόπτωσης, τόσο περισσότερο νερό αποθηκεύεται στα ρεύματα. Το νερό αυτό θα απορρεύσει μετά την βροχόπτωση, επιμηκύνοντας τον χρόνο απορροής.

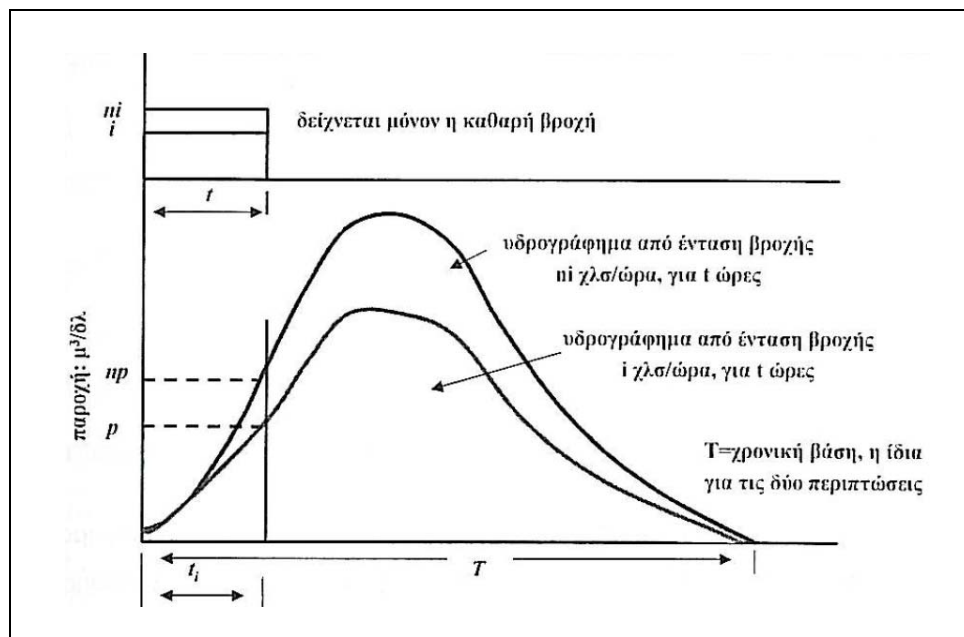
Το δεύτερο κριτήριο μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για υδρογραφήματα όπου τους έχει αφαιρεθεί η βασική ροή, καθώς η βασική ροή προέρχεται από προγενέστερες βροχές που ακόμα επηρεάζουν με ουσιαστικό τρόπο τα υδατορρεύματα. Ταυτόχρονα, μόνο ως παραδοχή μπορεί να θεωρηθεί ότι προηγούμενες βροχές αφήνουν ανεπηρέαστη την λεκάνη απορροής στο σύνολό της, αφού είναι γεγονός ότι η απόκριση που θα έχει η λεκάνη απορροής μετά από ξηρή περίοδο θα είναι διαφορετική από την απόκριση που θα έχει αν της βροχόπτωσης είχε προηγηθεί, σε σύντομο χρονικό διάστημα, άλλη βροχόπτωση, που θα έχει αφήσει σχετικά υγρή την λεκάνη απορροής.

---

<sup>2</sup> Μιμίκου, Μπαλτάς, 2002

Τέλος, η τρίτη παραδοχή είναι γενικά αποδεκτή για εύλογο χρονικό διάστημα, φτάνει να μην έχει μεταβληθεί η κατάσταση της λεκάνη από εξωγενείς αιτίες όπως κατασκευές, πυρκαγιές, αλλαγή των χρήσεων γης και της φυτοκάλυψης σε μεγάλη κλίμακα της λεκάνης.

Οι δύο βασικές αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Σύμφωνα με την αρχή της αναλογίας δύο ενεργές βροχές ίδιας χρονικής διάρκειας αλλά διαφορετικών εντάσεων δίνουν υδρογραφήματα ίδιας χρονικής βάσης αλλά με τεταγμένες, σε κάθε χρονική στιγμή, που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων.

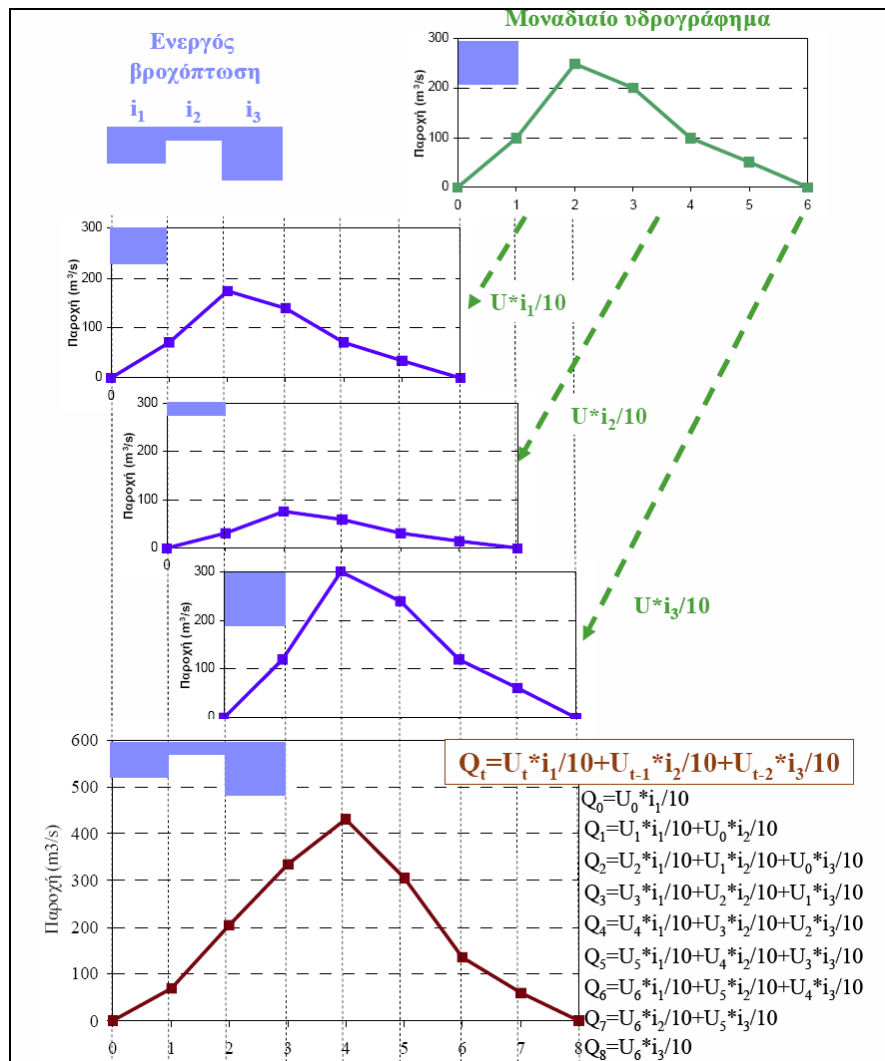


**Σχήμα 1-1 Η αρχή της αναλογίας του μοναδιαίου υδρογραφήματος<sup>3</sup>**

Η αρχή της επαλληλίας θεωρεί ότι το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων. Η χρονική αρχή των επιμέρους υδρογραφημάτων που αθροίζονται, ταυτίζεται με την αρχή των αντιστοίχων επεισοδίων ενεργού βροχόπτωσης.

<sup>3</sup> Πηγή: Μιμίκου, Μπαλτάς, 2002, «Τεχνική Υδρολογία»





**Σχήμα 1-2 Κατάρτιση υδρογραφήματος με βάση τις αρχές αναλογίας και επαλληλίας<sup>4</sup>**

Εφαρμόζοντας αυτές τις δυο αρχές, γίνεται η παραγωγή του υδρογραφήματος οποιασδήποτε βροχόπτωσης έχοντας γνωστό το μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνη απορροής. Προηγουμένως όμως, το υετογράφημα των βροχοπτώσεων πρέπει να «καθαριστεί», δηλαδή να αφαιρεθούν από το υετογράφημα οι κατακρατήσεις του εδάφους που δεν καταλήγουν στην άμεση απορροή. Αυτό γίνεται με διάφορες μεθόδους όπως η μέθοδος του δείκτη Φ ή η μέθοδος SCS. Σε επόμενο κεφάλαιο θα αναπτυχθεί εκτενέστερα αυτή η διαδικασία.

<sup>4</sup> Πηγή: Μαμασης Ν. Παρουσίαση Μαθήματος «Προχωρημένη Υδρολογία» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», 2007

## ***1.4 Υδρολογικά μοντέλα σε Σ.Γ.Π. (G.I.S)***

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν, σημαντικά, καταναμημένα υδρολογικά μοντέλα που εκμεταλλεύονται την χωρική κατανομή των δεδομένων. Τα καταναμημένα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να συνδυάσουν πληροφορίες για την χωρική μεταβλητότητα της τοπολογίας, των χρήσεων γης, της γεωλογίας και οποιονδήποτε άλλων παραμέτρων περιλαμβάνει ένα μοντέλο. Το μεγάλο μειονέκτημα των καταναμημένων μοντέλων, στην προ των υπολογιστών εποχή, ήταν ο μεγάλος όγκος υπολογισμών που έπρεπε να γίνουν με το χέρι. Το πρόβλημα αυτό λύθηκε με την είσοδο του ηλεκτρονικού υπολογιστή στην υπηρεσία των επιστημόνων και των μηχανικών. Το αμέσως επόμενο πρόβλημα που προέκυψε ήταν η διαχείριση του μεγάλου όγκου των δεδομένων και των υπολογισμών από ένα κατάλληλο λογισμικό. Ως συνέπεια, πραγματοποιήθηκε στροφή των υδρολόγων προς τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π. - G.I.S.)

Το βασικό πλεονέκτημα των Σ.Γ.Π. είναι η οργάνωση και επεξεργασία των δεδομένων με τοπολογικές σχέσεις αναφορικά με τον γεωγραφικό χώρο. Τα Σ.Γ.Π. μπορούν να διαχειριστούν τον μεγάλο όγκο δεδομένων και επεξεργασιών που απαιτούν τα καταναμημένα υδρολογικά μοντέλα. Επίσης, με την ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής δύναμης των υπολογιστών, δόθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης περισσότερο πολύπλοκων και αναλυτικών υδρολογικών μοντέλων, τα οποία εκτελούνται κατά κύριο λόγο μέσα σε περιβάλλον ενός Σ.Γ.Π.

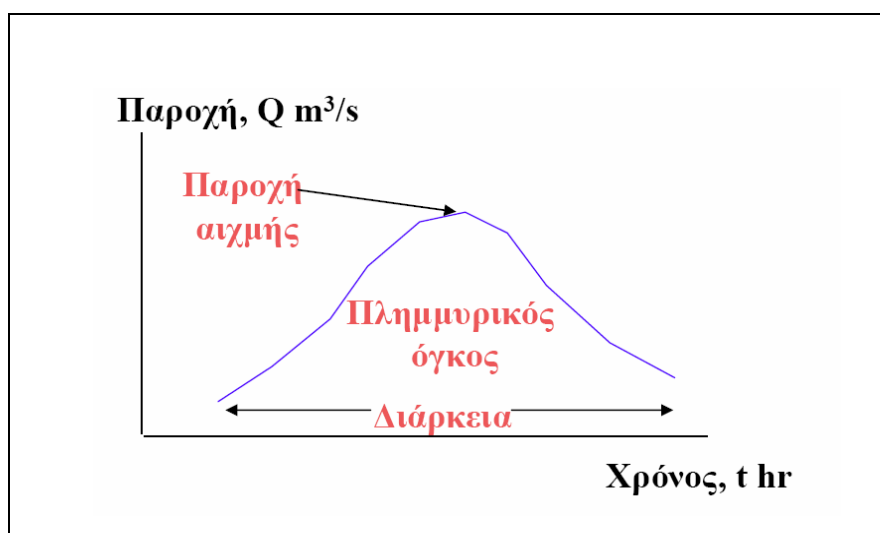
Η παρούσα εργασία, έλαβε χώρα μέσα σε περιβάλλον Σ.Γ.Π. ώστε να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα των Σ.Γ.Π. Υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό ArcGIS της ESRI έκδοση 9.2, το οποίο περιλαμβάνει σειρά από προγράμματα, μεταξύ αυτών και το ArcMap, στο περιβάλλον του οποίου έλαβε χώρα η επεξεργασία των δεδομένων και η ανάπτυξη του μοντέλου βροχής - απορροής που περιγράφεται παρακάτω. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Microsoft Excel για την δημιουργία των πινάκων και των σχημάτων καθώς επίσης και πλήθος άλλων υπολογισμών και αναλύσεων όπως, για παράδειγμα, η σύγκριση των παρατηρημένων από τα προσομοιωμένα υδρογραφήματα.

## 1.5 Αντιπλημμυρικά έργα

Ο υδραυλικός σχεδιασμός ενός αντιπλημμυρικού έργου γίνεται με βάση την εκτίμηση μιας πλημμύρας η οποία ονομάζεται πλημμύρα σχεδιασμού. Η έννοια της πλημμύρας σχεδιασμού είναι ότι το έργο σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να παραμένει ασφαλές και λειτουργικό για πλημμύρες μικρότερες ή ίσες της πλημμύρας σχεδιασμού.

Τα τρία κύρια μεγέθη μιας πλημμύρας είναι:

- Η παροχή αιχμής και η αντίστοιχη στάθμη στο υδατόρρευμα
- Ο πλημμυρικός όγκος
- Η χρονική διάρκεια



Σχήμα 1-3 Χαρακτηριστικά μεγέθη πλημμύρας<sup>5</sup>

Εντούτοις, το κυριότερο χαρακτηριστικό της πλημμύρας, από τα παραπάνω, είναι η τιμή της πλημμυρικής αιχμής. Με βάση αυτήν την τιμή γίνεται ο υδραυλικός σχεδιασμός των αντιπλημμυρικών έργων. Συνεπώς, η επιτυχία ή μη ενός υδρολογικού μοντέλου που κάνει προσομοίωση και εκτίμηση πλημμυρών, κρίνεται κατά κύριο λόγο από την ορθότητα της εκτίμησης της πλημμυρικής αιχμής.

Επίσης, αρκετά σημαντικός είναι και ο χρόνος εμφάνισης της αιχμής (χρόνος ανόδου ή χρόνος αιχμής), και για τον λόγο αυτό μερικά μοντέλα προσπαθούν να τον προσδιορίσουν.

<sup>5</sup> Πηγή: Μαμάσης, Παρουσίαση στο μάθημα «Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά έργα» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», 2007

## ***1.6 Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας***

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου που να προσομοιώνει την φύση είναι ένα αρκετά δύσκολο εγχείρημα, με αμφίβολα αποτελέσματα. Η ανάπτυξη ενός φυσικού μοντέλου δεν μπορεί να γίνει έστω κι αν θεωρηθεί ότι υπάρχει πλήρης γνώση των φυσικών νόμων και φαινομένων που διέπουν τον υδρολογικό κύκλο, κάτι που δεν ισχύει. Αυτό, γιατί δεν υπάρχει πλήρης γνώση της υφιστάμενης κατάστασης. Αντιθέτως, θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι τα διαθέσιμα δεδομένα είναι ελάχιστα έως ανεπαρκή. Συνεπώς, η ακρίβεια του μοντέλου και η επιλογή των παραδοχών που γίνονται, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό από τα διαθέσιμα δεδομένα (ποσότητα και ποιότητα).

Η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να παρουσιάσει ένα νέο κατανεμημένο εννοιολογικό μοντέλο βροχής - απορροής, όπου προσομοιώνει μεμονωμένα υδρολογικά γεγονότα, και συγκεκριμένα τα υδρογραφήματα. Το μοντέλο αυτό είναι προσδιοριστικό γιατί δεν εισάγεται στην διαδικασία η στοχαστικότητα των μεταβλητών που χρησιμοποιεί. Κύριος στόχος του μοντέλου είναι η εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής και κατά δεύτερο λόγο η εκτίμηση του χρόνου ανόδου (ή χρόνου αιχμής).

Αναλυτικότερα, προσδιορίζει το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας της λεκάνης απορροής, από την οποία προκύπτει ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα της λεκάνης. Η όλη διαδικασία προσδιορισμού του ιστογράμματος χρόνου – επιφάνειας εφαρμόζεται αποκλειστικά σε περιβάλλον G.I.S. Προέκυψε με τροποποίηση υπαρχόντων μοντέλων βροχής – απορροής, εισάγοντας νέες τεχνικές (νέους εμπειρικούς τύπους). Αναπτύχθηκε έτσι ώστε να μπορεί να εκτελείται α) σε λεκάνες με μη διαθέσιμα υδρολογικά δεδομένα & β) χωρίς να χρησιμοποιεί πολύπλοκες μακροεντολές που αυξάνουν τον χρόνο εκτέλεσης του.

## ***1.7 Πρωτότυπα σημεία***

Σε προγενέστερες εργασίες υπολογιζόταν το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας αθροίζοντας τις ταχύτητες χερσαίας ροής με της ταχύτητες υδρογραφικού δικτύου, μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Ο υπολογισμός της χερσαίας ροής έγινε με την ίδια διαδικασία. Το πρωτότυπο σημείο της παρούσης εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθόδου υπολογισμού της ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου.

Η Kilgore (1997) ανέπτυξε μοντέλο αυτόματου υπολογισμού των ταχυτήτων του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιώντας πολύπλοκους μαθηματικούς υπολογισμούς χρησιμοποιώντας παράλληλα με το G.I.S. πρόγραμμα σε γλώσσα C. Οι Δέρβος (2005) και Βαρσάμου (2007), όρισαν τις ταχύτητες υδρογραφικού δικτύου χειροκίνητα, μέσα από διαδικασία ρύθμισης. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ρουτίνα αυτόματου υπολογισμού της ταχύτητας ροής του υδρογραφικού δικτύου, χρησιμοποιώντας εμπειρικό τύπο που υπολογίζει το βάθος ομοιόμορφης ροής σε κάθε σημείο του υδρογραφικού δικτύου, από το οποίο υπολογίζονται οι ταχύτητες υδρογραφικού δικτύου. Η εισαγωγή του εμπειρικού τύπου έγινε ώστε να αποφευχθούν οι πολυάριθμοι υπολογισμοί που εκτελούσε το C πρόγραμμα της Kilgore, για να μειωθεί χρόνος υπολογισμού της ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου, για να λαμβάνει χώρα το σύνολο των υπολογισμών και της διαδικασίας αποκλειστικά σε περιβάλλον G.I.S. και για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο ακόμα και σε λεκάνες όπου δεν υπάρχουν μετρημένες απορροές ώστε να γίνει ρύθμιση, καθώς η χειροκίνητη επιλογή των ταχυτήτων υδρογραφικού δικτύου, προϋποθέτει την ρύθμισή τους.

## **1.8 Διάρθρωση της εργασίας**

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο το Σ.Γ.Π. αναλύει υδρολογικά την λεκάνη απορροής, και επιπλέον παρουσιάζεται η μέθοδος χρόνου - επιφάνειας. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η λεκάνη απορροής του ποταμού Καλαμά και η υπολεκάνη Αρετή, για την οποία εφαρμόστηκε το μοντέλο βροχής - απορροής. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της χερσαίας ροής και της ροής του υδρογραφικού δικτύου. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται και ο τρόπος ανάπτυξης του εμπειρικού τύπου που υπολογίζει την ταχύτητα στο υδατόρρευμα. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται τα παρατηρημένα επεισόδια βροχής – απορροής καθώς επίσης και ο υπολογισμός του ενεργού υετογραφήματος με την μέθοδο SCS. Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η εκτέλεση του μοντέλου και γίνεται στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων. Επιπροσθέτως, παρουσιάζεται η ανάλυση ευαισθησίας του νέου μοντέλου. Το 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο υπάρχουν γενικά συμπεράσματα από την παρούσα εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Στο τέλος παρατίθεται παράρτημα με τεχνικές συμβουλές για την εκτέλεση του μοντέλου, πίνακες με την συνολική διαδικασία του μοντέλου για μη αυτόματη εκτέλεση, με επεξήγηση του κάθε βήματος, και διαγράμματα ροής με τις εντολές του μοντέλου όπως δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον του ArcGIS.

## 2 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ Σ.Γ.Π. (G.I.S.)

### 2.1 Γενικά χαρακτηριστικά των Σ.Γ.Π.

Κατά καιρούς έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί για τα Σ.Γ.Π. όπως «Ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης, ανάλυσης και απόδοσης πληροφορίας που αναφέρεται σε φαινόμενα που εξελίσσονται στο γεωγραφικό χώρο» (Goodchild, 1985). Σύμφωνα με τον Βαϊόπουλο (1997), πρόκειται για ένα δυναμικό σύστημα πληροφορίας υψηλής ποιότητας, χρησιμοποιώντας την εξελιγμένη τεχνολογία της πληροφορικής.

Η σχετικά καθυστερημένη εμφάνιση της τεχνολογίας των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) και των Συστημάτων Ψηφιακής Χαρτογραφίας (Σ.Ψ.Χ.), ερμηνεύεται ως ένα βαθμό από το γεγονός ότι ο τύπος των πληροφοριών που αποθηκεύει, διαχειρίζεται, αναλύει και αποδίδει ένα χαρτογραφικό σύστημα και κατ' επέκταση ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών αλλά και το είδος της ανάλυσης των χωρικών δεδομένων, είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο σε σχέση με πληροφορίες μη γεωγραφικού χαρακτήρα<sup>1</sup>. Παρά ταύτα, και μετά την επίλυση των προβλημάτων που έχουν σχέση με τη δομή και οργάνωση των χαρτογραφικών στοιχείων σε ψηφιακό περιβάλλον, διατίθενται πλέον χαρτογραφικά συστήματα, που χαρακτηρίζονται από πληρότητα και λειτουργικότητα. Τα αίτια που οδήγησαν προς την κατεύθυνση αυτή είναι<sup>1</sup>:

- Γενική παραδοχή των πλεονεκτημάτων που έχουν τα γεωγραφικά χαρτογραφικά στοιχεία σε ψηφιακή μορφή.
- Το αυξανόμενο κόστος της παραδοσιακής χαρτογραφικής εργασίας σε αντίθεση με το συνεχώς μειούμενο κόστος των χαρτογραφικών συστημάτων σε σχέση και με την αδυναμία εύρεσης «παραδοσιακών» χαρτογράφων.
- Οι συνεχώς βελτιούμενες μέθοδοι και τεχνολογία για ψηφιοποίηση, έλεγχο, σχεδίαση και παραγωγή χαρτών.
- Η αυξανόμενη απαίτηση για γεωγραφικά – χαρτογραφικά στοιχεία σε ψηφιακή μορφή, με σκοπό την επεξεργασία τους για δημιουργία μοντέλων του γεωγραφικού χώρου και

---

<sup>1</sup> Τσούλος, 1999

την αξιοποίησή τους σε περιβάλλον Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Αυτό το πλεονέκτημα των Σ.Γ.Π. το εκμεταλλεύονται και οι υδρολόγοι, για την υδρολογική ανάλυση των περιοχών ενδιαφέροντός τους, και κατ' επέκταση και η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

- Η διαθεσιμότητα ελεγμένων και ολοκληρωμένων προγραμμάτων λογισμικού, τα οποία αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τα διάφορα χαρτογραφικά προβλήματα καθώς και αξιόπιστων χαρτογραφικών βάσεων δεδομένων.
- Η αναγνώριση της εμπορικής σημασίας των χαρτογραφικών εφαρμογών σε ψηφιακό περιβάλλον.

Οι γεωγραφικές πληροφορίες που διαχειρίζεται ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών είναι πληροφορίες που αναφέρονται σε γεωγραφικά στοιχεία. Ως γεωγραφικό στοιχείο ορίζεται το χωρικό εκείνο στοιχείο ή οντότητα το οποίο υποπίπτει στην ανθρώπινη αντίληψη, αναφέρεται δε σε οντότητες που έχουν σχέση με τη γη, οι οποίες δεν υποδιαιρούνται περαιτέρω σε άλλες επί μέρους οντότητες<sup>2</sup>. Κάθε γεωγραφικό στοιχείο προσδιορίζεται από δύο κατηγορίες χαρακτηριστικών παραμέτρων, οι οποίες είναι:

- Χωρική Πληροφορία
- Περιγραφική πληροφορία

Χωρική πληροφορία είναι ο προσδιορισμός της θέσης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των γεωγραφικών δεδομένων με βάση ένα σύστημα αναφοράς. Περιγραφική πληροφορία είναι τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά τα οποία αναφέρονται στα γεωγραφικά δεδομένα. Το μεγάλο πλεονέκτημα των Σ.Γ.Π. είναι η σύνδεση των χωρικών με τις περιγραφικές πληροφορίες καθώς και η εκτέλεση πράξεων μετά χαρτών<sup>3</sup>.

### 2.1.1 Κανονικοποιημένα μοντέλα ή μωσαϊκά

Τα ψηφιακά χωρικά μοντέλα διακρίνονται σε δύο υποκατηγορίες:

- Διανυσματικά μοντέλα (Vector)
- Κανονικοποιημένα (Raster)

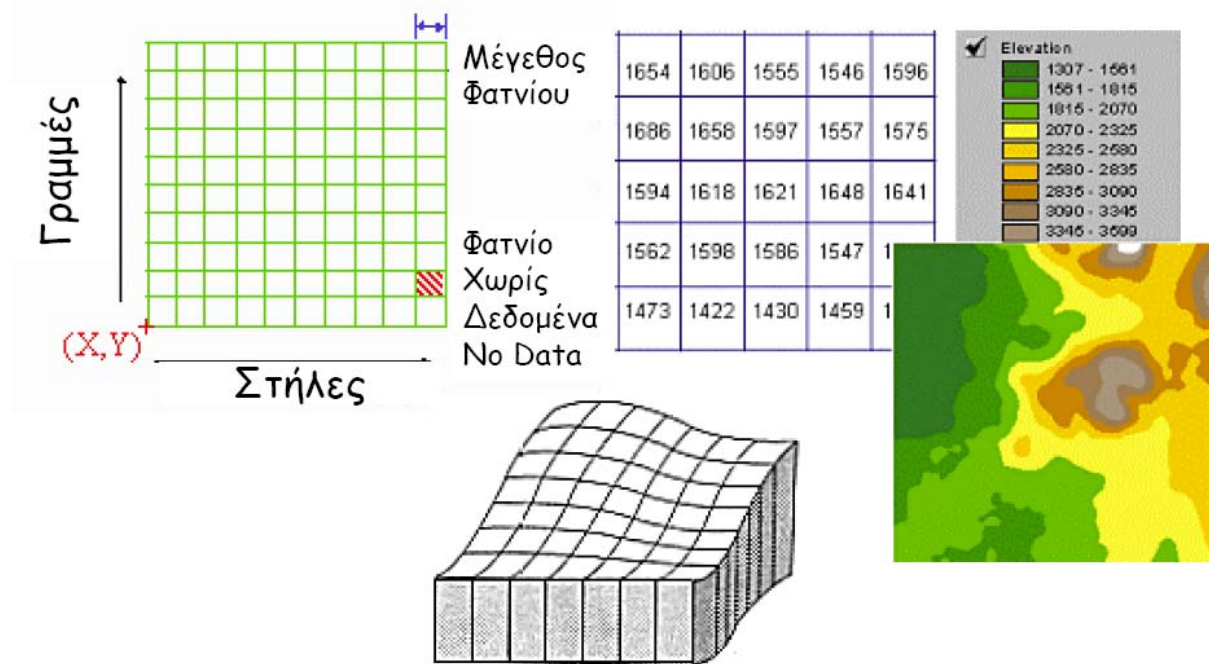
---

<sup>2</sup> Τσούλος, 1999

<sup>3</sup> (ESRI, Marathon Data Systems)

Στα διανυσματικά μοντέλα η βασική λογική μονάδα είναι η γραμμή , εκφρασμένη από μια σειρά σημείων με συντεταγμένες x, y. Αντίθετα, στα κανονικοποιημένα μοντέλα, ο γεωγραφικός χώρος χωρίζεται σε χωρία κανονικού σχήματος , τα φατνία. Το κάθε φατνίο αποτελεί βασική λογική μονάδα και όλα μαζί ένα κάναβο (GRID). Σε κάθε λογική μονάδα αντιστοιχεί το περιεχόμενο (τιμή) μία συνεχούς μεταβλητής και ως εκ τούτου τα μοντέλα της κατηγορίας αυτή είναι πλέον κατάλληλα για την ψηφιακή καταγραφή μη διακριτών (συνεχών) οντοτήτων , όπως για παράδειγμα, ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους<sup>4</sup>.

Η υδρολογική ανάλυση στα Σ.Γ.Π. χρησιμοποιεί ως βάση της κανονικοποιημένα μοντέλα, για να μπορέσει να προσομοιώσει την κίνηση της κάθε σταγόνας πάνω στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Παρακάτω, αναπτύσσεται η μεθοδολογία υπολογισμού των υδρολογικών διεργασιών πάνω στο Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους.



Σχήμα 2-1 Κανονικοποιημένο χωρικό μοντέλο<sup>5</sup>

## 2.2 Υδρολογικά μοντέλα σε Σ.Γ.Π.

Από το ευρύ φάσμα εφαρμογών που υποστηρίζουν τα Σ.Γ.Π. δεν θα μπορούσαν να εξαιρεθούν τα υδρολογικά μοντέλα. Τα υδρολογικά μοντέλα συνδυάζουν πολλά επί μέρους

<sup>4</sup> Τσούλος, 1999

<sup>5</sup> Πηγή: Σκοπελίτη, Στάμου, Παρουσίαση στο μάθημα «Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», 2006



θεματικά επίπεδα όπως τοπογραφικά, γεωμορφολογικά, εδαφολογικά και επίπεδα χρήσεων γης. Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος από μοντέλα αυτού του είδους.

Από την ξένη βιβλιογραφία αξίζει να αναφερθεί η Kilgore (1997) η οποία χρησιμοποίησε το GIS και την μέθοδο χρόνου επιφάνειας για τον προσδιορισμό του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος. Το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα προέκυψε από το ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας, με την βοήθεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Διαχώρισε την χερσαία ροή από την ροή του υδρογραφικού δικτύου, και τις υπολόγισε με διαφορετική μεθοδολογία. Ύστερα άθροισε τις ταχύτητες ροής υδρογραφικού δικτύου με τις ταχύτητες χερσαίας ροής και πρόκυψε ο τελικός κάναβος ταχυτήτων ροής, από τον οποίο προέκυψε το ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας. Τα παραγόμενα, με αυτή τη μέθοδο, υδρογραφήματα ήταν πλησιέστερα στα παρατηρημένα υδρογραφήματα απορροών από εκείνα που παρήχθησαν χρησιμοποιώντας άλλους τύπους συνθετικών υδρογραφημάτων. Η μεθοδολογία που χρησιμοποίησε εφαρμόζεται και στη παρούσα εργασία, με κάποια τροποποίηση στον υπολογισμό των ταχυτήτων ροής υδρογραφικού δικτύου.

Παρακάτω περιγράφεται ο τύπος υπολογισμού των ταχυτήτων υδρογραφικού δικτύου, που χρησιμοποίησε η Kilgore. Χρησιμοποιεί την εξής μεθοδολογία:

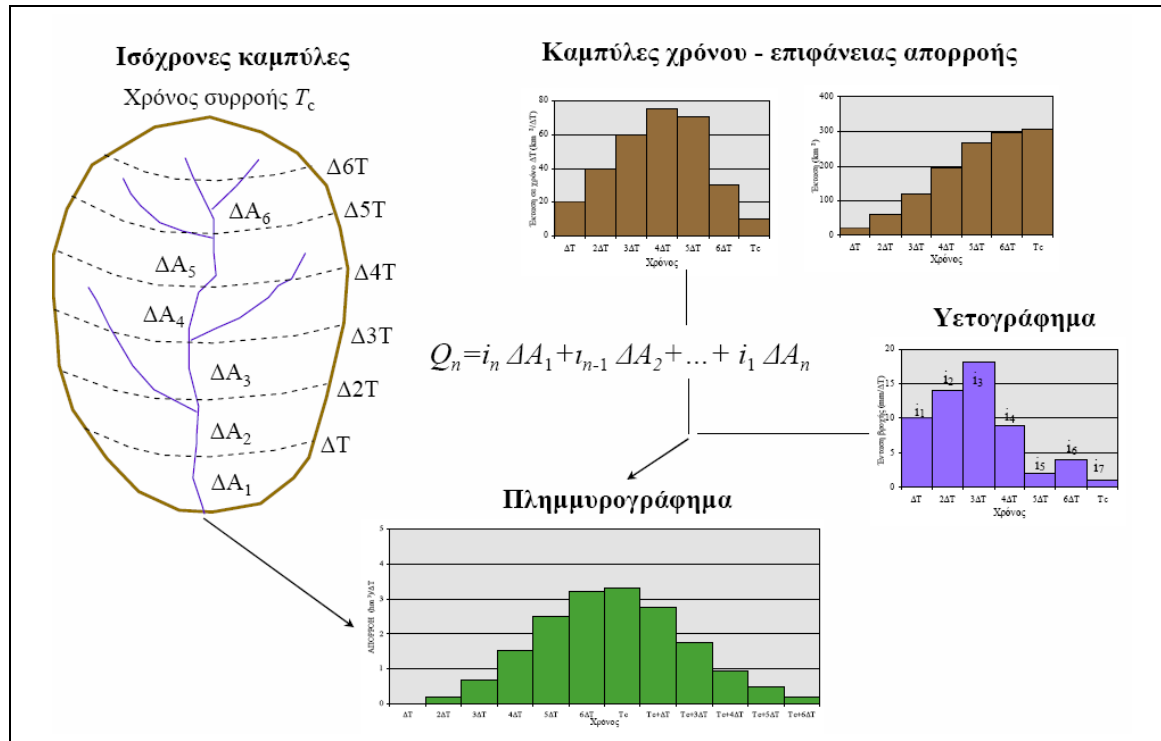
Κάνει την παραδοχή ότι το υδρογραφικό προσομοιώνεται από κανάλι τραπεζοειδούς διατομής, συγκεκριμένης διατομής και συγκεκριμένης τραχύτητας, και υπολογίζει με βοηθητικό προγράμματα σε γλώσσα C, που τρέχει παράλληλα με το GIS, το ομοιόμορφο βάθος ροής σε κάθε φατνίο. Έχοντας γνωστό το βάθος ροής, την παροχή, την τραχύτητα, την κλίση και την γεωμετρία του καναλιού υπολογίζει τις ταχύτητες ροής σε κάθε φατνίο χωριστά.

Από την ελληνική βιβλιογραφία, ο Δέρβος (2005) χρησιμοποίησε την μεθοδολογία της Kilgore, για παραγωγή συνθετικών υδρογραφημάτων σε πειραματική λεκάνη, απλοποιώντας όμως την διαδικασία υπολογισμού του υδρογραφικού δικτύου. Ταξινόμησε το υδρογραφικό δίκτυο και έθεσε χειροκίνητα ταχύτητες υδατορεύματος, ανάλογα τις τάξεις του υδατορεύματος. Οι τιμές των ταχυτήτων προέκυψαν μετά από την διαδικασία της ρύθμισης. Με τον τρόπο αυτό απέφυγε την πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία υπολογισμού των βαθών ομοιόμορφης ροής από πρόγραμμα σε γλώσσα C. Η όλη επεξεργασία και δημιουργία ιστογράμματος χρόνου επιφάνειας έλαβε χώρα αποκλειστικά σε περιβάλλον GIS. Με την ίδια μεθοδολογία που εργάστηκε και ο Δερβος, εργάστηκε και η Βαρσάμου (2007) για την κατάρτιση ισόχρονων καμπύλων απορροής στη λεκάνη απορροής «Αρκουδόρεμα» του ποταμού Νέστου.

## 2.3 Μέθοδος χρόνου - επιφάνειας<sup>6</sup>

Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου χρόνου επιφάνειας είναι το ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας που εκφράζει τη σχέση μεταξύ του χρόνου διαδρομής της απορροής και της επιφάνειας της λεκάνης απορροής που συμβάλλει στην απορροή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (McCuen, 1989). Η λεκάνη χωρίζεται σε υποπεριοχές με καμπύλες που ονομάζονται ισόχρονες. Ισόχρονη καμπύλη είναι ο γεωμετρικός τόπων των σημείων όπου οι σταγόνες της βροχής απέχουν χρονικά το ίδιο από την έξοδο της λεκάνης. Οι ισόχρονες καμπύλες δεν μπορούν να διασταυρωθούν και μπορούν να ξεκινούν και να τερματίζουν μόνο στα όρια της λεκάνης, (Dooge, 1959).

Μέθοδος χρόνου – επιφάνειας μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μικρές ή μεσαίου μεγέθους λεκάνες καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την αποθηκευτικότητα της λεκάνης. Επίσης ισχύουν οι δύο αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος, η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Αυτό σημαίνει ότι για τον υπολογισμό της πλημμυρικής απορροής εφαρμόζεται μία και μοναδική συνάρτηση ανεξάρτητα από τις μεταβολές της έντασης της ενεργού βροχόπτωσης. (Sagjafian, Julien, Rajaie 2002).



Σχήμα 2-2 Μέθοδος χρόνου - επιφάνειας<sup>7</sup>

<sup>6</sup> Δερβος, 2005 & Βαρσάμου, 2007

<sup>7</sup> Πηγή: Μαμάσης, Παρουσίαση στο μάθημα «Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά έργα» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», 2007

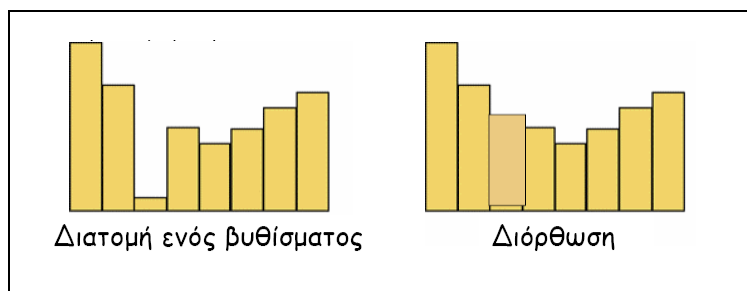
## 2.4 Ανάπτυξη ιστογράμματος χρόνου - επιφάνειας.

Η διαδικασία για τον την ανάπτυξη του ιστογράμματος χρόνου – επιφάνειας περιλαμβάνει συνοπτικά τα εξής στάδια:

- *Πρώτο στάδιο:* Επεξεργασία του Ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) για τον σχηματισμό του υδρογραφικού δικτύου, και σχηματισμός του υδρογραφικού δικτύου.
- *Δεύτερο στάδιο:* Δημιουργία κανάβου ταχυτήτων υδρογραφικού δικτύου (channel flow). Η ταχύτητα αυτή είτε εισάγεται χειροκίνητα από τον χρήστη είτε προκύπτει με μια μεθοδολογία προσομοίωση της κοίτης του ποταμού με κάποια διαμορφωμένη διατομή.
- *Τρίτο στάδιο:* Υπολογίζεται ο κánaβος ταχυτήτων χερσαίας ροής (overland flow), βάση των χρήσεων γης και της έντασης της βροχόπτωσης.
- *Τέταρτο στάδιο:* Σε αυτό το στάδιο συνδυάζονται οι δύο κánaβοι ταχυτήτων (ροής υδρογραφικού δικτύου και χερσαίας ροής) και προκύπτει ο τελικός κánaβος ταχυτήτων ροής. Από αυτόν προσδιορίζεται το ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας το οποίο χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

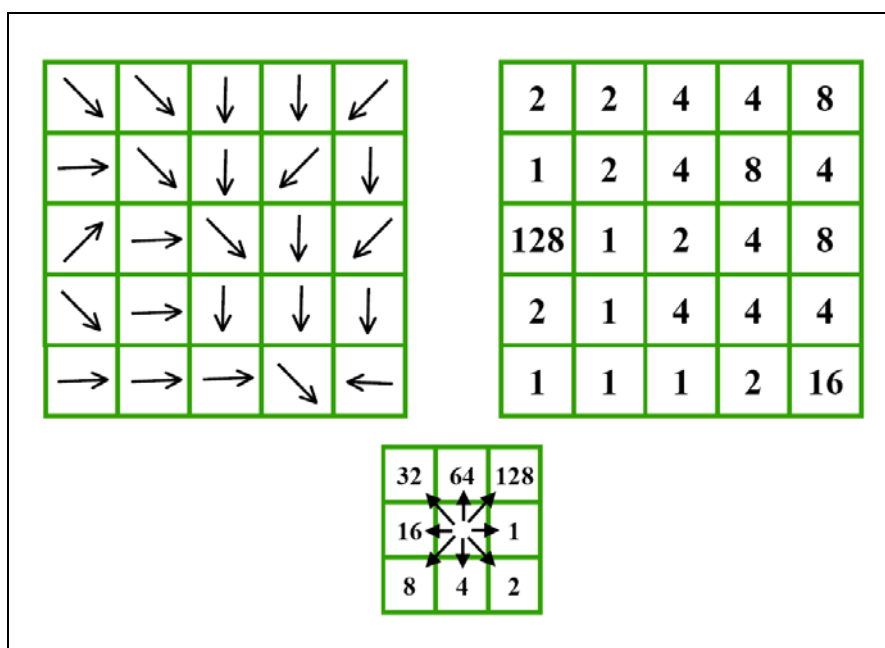
### 2.4.1 Σχηματισμός υδρογραφικού δικτύου

Ολόκληρη η διαδικασία της μεθόδου βασίζεται σε ένα ψηφιοποιημένο τοπογραφικό χάρτη που ονομάζεται ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ ή DEM). Πριν την χρησιμοποίηση του για την υδρολογικά ανάλυση της λεκάνης είναι απαραίτητη η διόρθωση του ώστε να προκύψει ένα υδρολογικά ορθό ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την δημιουργία του ΨΜΕ δημιουργούνται ψευδή βυθίσματα που απομονώνουν μέρος της λεκάνης απορροής. Ως βύθισμα θεωρείται το φατνίο όπου όλα τα γειτονικά του φατνία έχουν μεγαλύτερο υψόμετρο (Σχήμα 2-3). Η διόρθωση γίνεται από την εντολή Fill του εργαλείου Hydrology στην επέκταση Spatial Analyst του ArcMap.



**Σχήμα 2-3 Διόρθωση ψευδών βυθισμάτων<sup>8</sup>**

Ακολουθεί η δημιουργία του κανάβου Διεύθυνσης ροής με τη εντολή Flow Direction του εργαλείου Hydrology στην επέκταση Spatial Analyst του ArcMap. Με την εντολή αυτή υπολογίζεται η κατεύθυνση του νερό κάθε φατνίου χωριστά. Το πρόγραμμα υπολογίζει όλες τις υψομετρικές διαφορές μεταξύ του κεντρικού φατνίου και των γειτονικών του και από εκείνα τα φατνία που έχουν χαμηλότερο υψόμετρο από το κεντρικό επιλέγει το γειτονικό εκείνο φατνίο με το οποίο υπάρχει η μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά (Σχήμα 2-4).

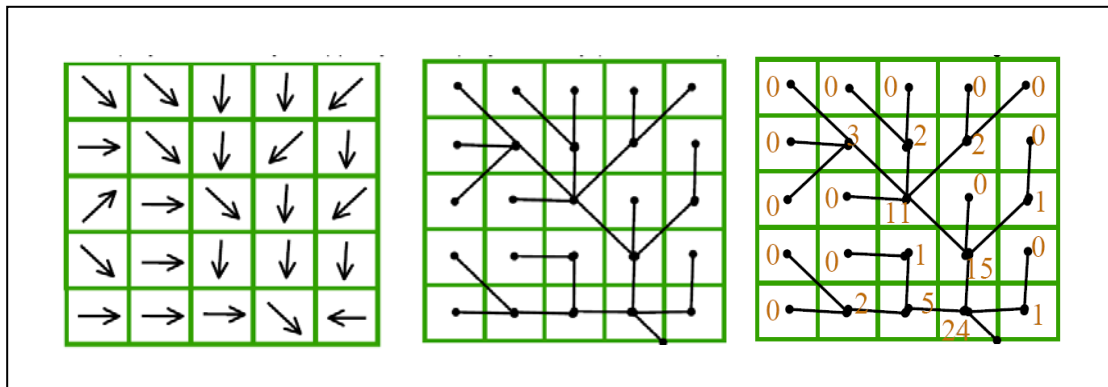


**Σχήμα 2-4 Κανάβος Διεύθυνσης ροής<sup>8</sup>**

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του κανάβου Συγκεντρωτικής ροής με εκτέλεση της εντολής Flow accumulation του εργαλείου Hydrology στην επέκταση Spatial Analyst του ArcMap. Η εντολή αυτή βασίζεται στον κανάβο Διεύθυνσης ροής και καθορίζει το μοναδικό μονοπάτι, για κάθε φατνίο, που ακολουθεί η σταγόνα της βροχής μέχρι να φτάσει στην έξοδο

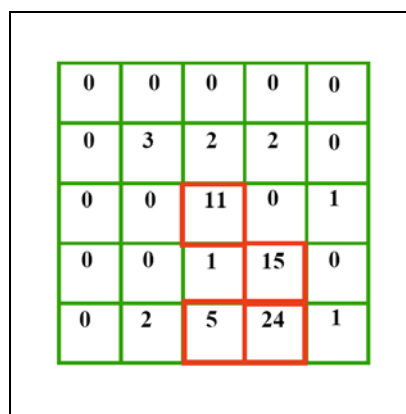
<sup>8</sup> Πηγή: Σκοπελίτη, Στάμου, Παρουσίαση στο μάθημα «Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»,2006

της λεκάνης. Ύστερα αριθμεί πόσα φατνία απορρέουν σε κάθε φατνίο και ο αριθμός που θέτει σε κάθε φατνίο είναι και ο συνολικός αριθμός των φατνίων που καταλήγουν σε αυτό.



**Σχήμα 2-5 Κάναβος Συγκενρωτικής ροής<sup>9</sup>**

Βασιζόμενο στον κάναβο συγκενρωτικής ροής, το μοντέλο μπορεί να σχηματίσει το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης. Η εντολή που χρησιμοποιεί είναι η Grater Than (Spatial Analyst Tools → Math → Logical → Grater Than) στην οποία τίθεται ως δεδομένο ο κάναβος συγκενρωτικής ροής και σύμφωνα με μια τιμή κατώφλι, που θέτει ο χρήστης, σχηματίζεται το υδρογραφικό δίκτυο. Το μοντέλο διαγράφει τις τιμές του κανάβου συγκενρωτικής ροής (τις θέτει ως No Data) που έχουν τιμή μικρότερη της τιμής του κατωφλίου (παράδειγμα στο Σχήμα 2-6).



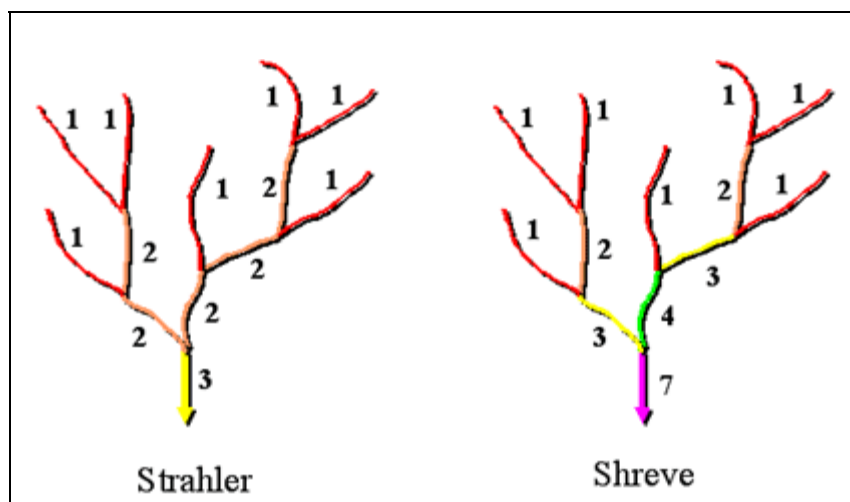
**Σχήμα 2-6 Επιλογή φατνίων με κατώφλι την τιμή 5<sup>9</sup>**

Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται για να ξεχωρίσουν τα φατνία του υδρογραφικού δικτύου από τα φατνία όπου κυριαρχεί η χερσαία ροή. Η επιλογή της τιμής του κατωφλίου γίνεται με

<sup>9</sup> Πηγή: Σκοπελίτη, Στάμου, Παρουσίαση στο μάθημα «Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», 2006

πολλούς τρόπους. Στην παρούσα εργασία προέκυψε ύστερα από την διαδικασία της ρύθμισης.

Τέλος, εφ' όσον κρίνεται σκόπιμο, μπορεί να γίνει η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου. Η τάξη των υδατορρευμάτων είναι ένα χαρακτηριστικό που αντανακλά το βαθμό διακλαδώσεως αυτών μέσα στη λεκάνη. Οι δύο μέθοδοι με τις οποίες γίνεται η ιεράρχηση του υδρογραφικού δικτύου είναι η μέθοδος Strahler και η μέθοδος Shreve. Στην μέθοδο Strahler η τάξη ενός κλάδου αυξάνει όταν διασταυρωθούν δύο κλάδοι με την ίδια τάξη, αλλιώς ο ενωμένος κλάδος παίρνει την μεγαλύτερη τάξη από τους δύο κλάδους. Αντίθετα στην ιεράρχηση κατά Shreve, κατά την ένωση δύο κλάδων η τάξη του ενωμένου κλάδου προκύπτει ως άθροισμα των τάξεων των δυο κλάδων που ενώνονται. Προτιμότερη διαδικασία ιεράρχηση είναι εκείνη του Strahler. Στο ArcGIS η εντολή που ιεραρχεί το υδρογραφικό δίκτυο είναι η Stream Order (Spatial Analyst Tools → Hydrology → Stream Order).



Σχήμα 2-7 Ιεράρχηση Υδρογραφικού δικτύου<sup>10</sup>

#### 2.4.2 Προσδιορισμός ταχυτήτων ροής

Το δεύτερο και το τρίτο βήμα για την κατάρτιση του ιστογράμματος χρόνου επιφάνειας είναι η δημιουργία κανάβου ταχυτήτων ροής υδρογραφικού δικτύου και χερσαίας ροής, αντίστοιχα.

Για δημιουργία κανάβου ταχυτήτων υδατορρεύματος, στην παρούσα εργασία, προσομοιώθηκε η κοίτη του ποταμού με μια τραπεζοειδή διατομή, και η ταχύτητα που προέκυψε, για κάθε φατνίο, είναι η ταχύτητα ομοιόμορφης ροή στο διαμορφωμένο κανάλι

<sup>10</sup> Πηγή: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/>

όπου έχει την κλίση και την παροχή του φατνίου. Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο αυτόματου υπολογισμού των ταχυτήτων αυτών και η αναλυτική περιγραφή του γίνεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Όσον αφορά την ταχύτητα χερσαίας ροής, ο υπολογισμός έγινε με βάση τον συνδυασμό της μεθόδου κινηματικού κύματος με την εξίσωση Manning. Για την διαδικασία αυτή χρειάζεται ένας κανάβος με τις τραχύτητες των εδαφών, ανάλογα με τις χρήσεις γης. Συνεπώς, για την εκτέλεση της διαδικασίας χρειάζονται δεδομένα χρήσεων γης (κανάβος χρήσεων γης) για την υπό μελέτη περιοχή. Αναλυτικότερα η διαδικασία περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο.

### 2.4.3 Υπολογισμός ιστογράμματος χρόνου - επιφάνειας

Από τον συνδυασμό του κανάβου ταχυτήτων υδατορρεύματος με τον κανάβο ταχυτήτων χερσαίας ροής προκύπτει ο τελικός κανάβος ταχυτήτων ροής. Ο αντίστροφος κανάβος του τελικού κανάβου ταχυτήτων ροής χρησιμοποιείται ως κανάβος «βαρών» στην εντολή Flow Length (Spatial Analyst Tools → Hydrology → Flow Length). Με την εντολή αυτή προσδιορίζεται ένα κανάβος όπου περιέχει το χρόνο απορροής του κάθε φατνίου μέχρι την έξοδο της λεκάνης απορροής. Από αυτόν τον κανάβο προκύπτει το ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας, ανάλογα με το χρονικό βήμα που επιλέγει ο χρήστης. Αθροίζονται τα εμβαδά των επιμέρους τμημάτων μεταξύ των ισόχρονων καμπυλών και προκύπτει το ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας που απεικονίζει το μέγεθος της λεκάνης που αποφορτίζεται στην έξοδο, σε κάθε χρονικό βήμα.

## 3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

### 3.1 Γεωγραφική θέση ποταμού Καλαμά

Ο ποταμός Καλαμάς ή Θύαμις είναι ποταμός της Ηπείρου, που πηγάζει από το όρος Μερόπη ή Νεμέρτσκα των ελληνοαλβανικών συνόρων, διασχίζει τον Νομό Ιωαννίνων και Θεσπρωτίας εκβάλλει βόρεια του βουνού της Στουπίτσας (Μαυρονόρος) και νότια του λόφου της Μαστιλίτσας, στο Ιόνιο πέλαγος, απέναντι από την Κέρκυρα, βορειοδυτικά της Ηγουμενίτσας<sup>1</sup>.

Η ανώτερη και μέση ροή του διασχίζει τοπία μεγάλης φυσικής ομορφιάς. Το ποτάμι, η βλάστηση και το τοπίο στις όχθες του σχηματίζουν εικόνες απείρου κάλλους. Το φαράγγι, τα στενά, η τοποθεσία «αναβρυστικά» με τις πηγές, το Δέλτα του Καλαμά και ο υδροβιότοπος, η περιοχή του φράγματος και οι παραπόταμοι του Καλαμά παρουσιάζουν ορισμένες από τις πιο όμορφες εικόνες του ποταμού<sup>2</sup>.



Εικόνα 3-1 Θεογέφυρο<sup>3</sup>

<sup>1</sup> <http://www.sagiada.gr/Neo-Delta.htm>

<sup>2</sup> <http://cultureportalweb.uoi.gr>

<sup>3</sup> Παύλος Νίκολος, <http://www.panoramio.com/photos>



Ανάμεσα στα χωριά Πέντε Εκκλησιές, Πολύδροσο και Μαλούνι, το ποτάμι τρυπάει τους βράχους σχηματίζοντας ένα επιβλητικό φαράγγι ενός περίπου χιλιομέτρου. Το φαράγγι ή αλλιώς τα Στενά του Καλαμά περιλαμβάνουν παραποτάμιο δάσος, θάμνους και γκρεμούς με αραιή βλάστηση. Επίσης, στην περιοχή αυτή ζουν μεγάλα αρπακτικά, σπάνια είδη πουλιών και λουλουδιών<sup>4</sup>.

Σήμερα ο Καλαμάς εκβάλλει βόρεια του βουνού της Σκουπίτσας (Μαυρονόρος) και νότια του λόφου της Μαστιλίτσας (Μασκελινίτσας). Έχει δημιουργήσει ένα νέο δέλτα με τις προσχώσεις του, που συνεχώς επεκτείνεται με γρήγορο ρυθμό. Πριν γίνουν έργα η κοίτη του Καλαμά βρισκόταν νότια του Μαυρονόρους, αλλά η μαιανδρική του διαδρομή μέσα στον κάμπο, δημιουργούσε τεράστια προβλήματα κυρίως το χειμώνα, εξαιτίας των πλημμυρών. Από παλιούς χάρτες, αλλά και από τις ποταμογενείς χερσονήσους του Δρέπανου και της Σκάλας Σαγιαδάς, συμπεραίνουμε ότι ο Καλαμάς κατά διαστήματα πρέπει να εξέβαλε σε όλη την περιοχή του τριγώνου με τέσσερις τουλάχιστον βασικές κοίτες. Σήμερα ο Καλαμάς εκβάλλει μόνο στο δέλτα. Οι κοίτες του ποταμού είναι γεμάτες από πλατάνια που σιγά σιγά παραχωρούν τη θέση τους στα αρμυρικά. Βόδια βόσκουν στις μεγάλες εκτάσεις που δημιούργησε ο ποταμός ενώ τα κοπάδια με τα άγρια άλογα που περιφέρονται είναι η ευχάριστη έκπληξη που το δέλτα επιφυλάσσει στον επισκέπτη<sup>5</sup>.



**Εικόνα 3-2 Το νέο δέλτα του Ποταμού Καλαμά<sup>5</sup>**

<sup>4</sup> <http://cultureportalweb.uoi.gr>

<sup>5</sup> <http://www.sagiada.gr/Neo-Delta.htm>



**Εικόνα 3-3 Το δέλτα του Ποταμού Καλαμά**

Τα Στενά και το Δέλτα του Καλαμά έχουν προταθεί για ένταξη στο ευρωπαϊκό οικολογικό δίκτυο Natura 2000 (όπως ορίζεται από την Οδηγία των Οικότοπων). Οι περιοχές αυτές θεωρούνται ως προστατευόμενες παρότι δεν έχει ολοκληρωθεί μέχρι σήμερα η διαδικασία επίσημης κήρυξης.

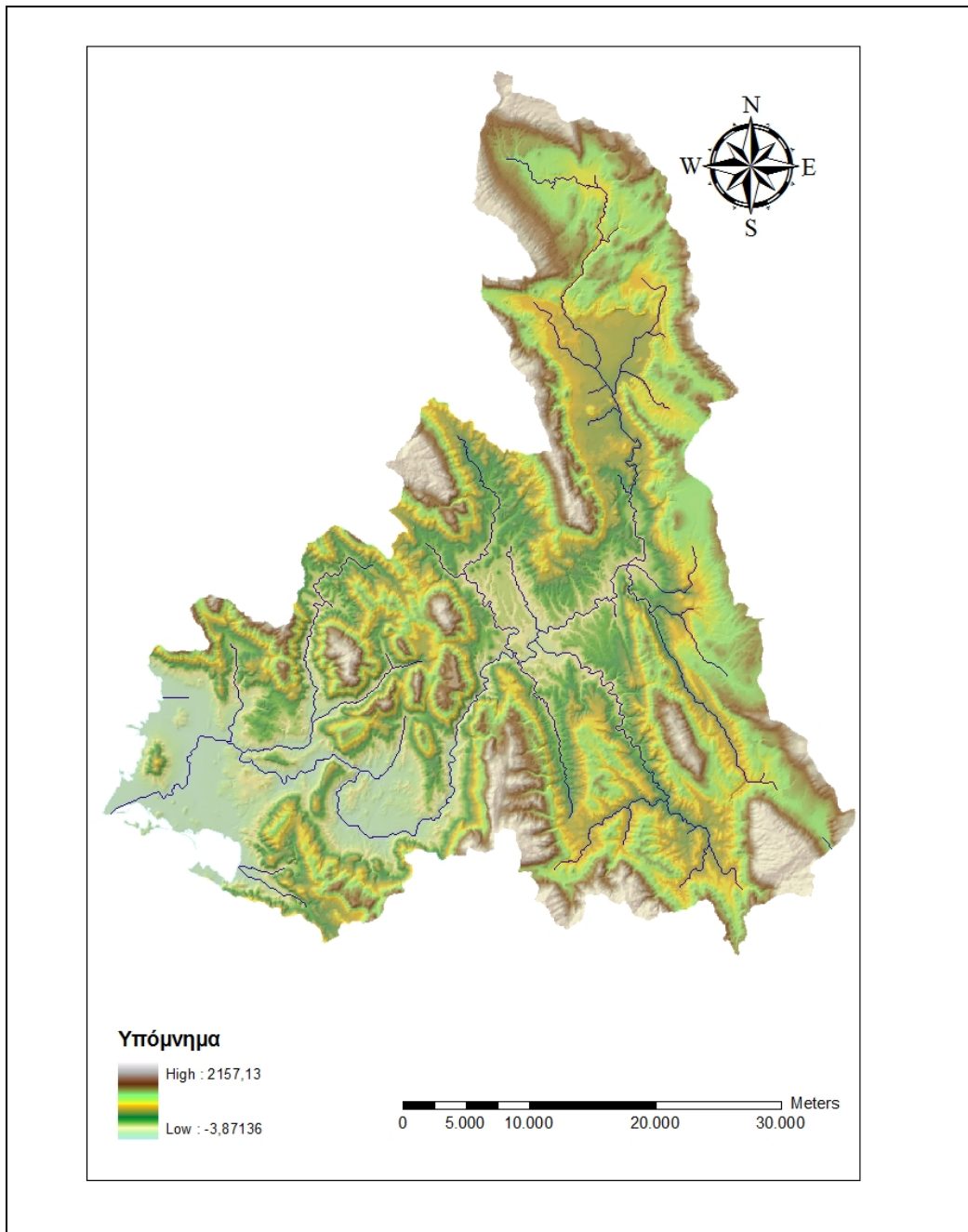
### ***3.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία λεκάνης ποταμού Καλαμά***

Το εμβαδόν της λεκάνης απορροή του π. Καλαμά είναι 1800 km<sup>2</sup> (στη θέση Κιοτέκι) και κατά μήκος της κύριας μισγάγγειας είναι περίπου 115 km<sup>2</sup>. Το μέγιστο πλάτος του είναι 300 m και το μέγιστο βάθος του είναι 1,92 m (στις 26/04/1993<sup>6</sup>). Η μέση ετήσια απορροή<sup>7</sup> του είναι 2048 hm<sup>3</sup>. Τα χαρακτηριστικά της τοπογραφική διαμόρφωσης της λεκάνης του ποταμο Καλαμά είναι οι μετρίως απότομες κλιτύες που φτάνουν στο απόλυτο υψόμετρο

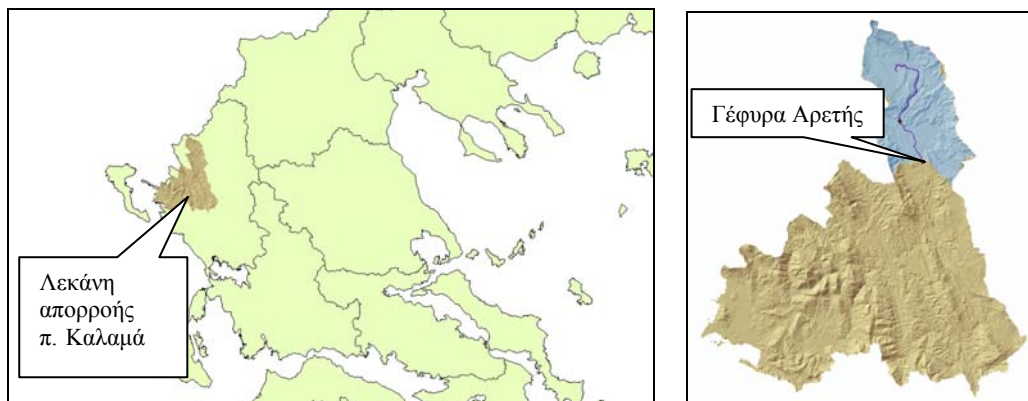
---

<sup>6</sup> <http://geogr.eduportal.gr>

<sup>7</sup> Υπουργείο Ανάπτυξης, 2003



**Σχήμα 3-1** Λεκάνη απορροής π. Καλαμά



**Σχήμα 3-2** Γεωγραφική θέση λεκάνης απορροής ποταμού Καλαμά – Θέση Αρετή

των 2.200 m, οι μικρής έκτασης πεδινές περιοχές σε διάφορες θέσεις κοντά στο ποτάμι και η επίπεδη αλλουβιακή πεδιάδα του δέλτα. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι +495.

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής είναι πλούσιο, γεγονός που οφείλεται στη μορφολογία της περιοχής και στις άφθονες βροχοπτώσεις και χιονοπτώσεις. Οι πιο σημαντικοί παραπόταμοι του Καλαμά από τα ανάντη προς τα κατόντη αυτού είναι οι: Γόρμος, Μέγερρος, Βελτίστικος, Σμολίτσας, Κούτσης, Τύρια, Μπανιά, Λαγκαβίτσα, Καλπακιώτικος. Μέσα στη λεκάνη του Καλαμά υπάρχει και η λίμνη Τζαραβίνα, έκτασης 22km<sup>2</sup>, μέσης στάθμης 455m και μέσου βάθους 35m.

Στην έξοδο της λεκάνης απορροής του π. Καλαμά επικρατεί θαλάσσιο μεσογειακό κλίμα ενώ στο εσωτερικό το κλίμα αλλάζει και γίνεται ηπειρωτικό. Συνεπώς, το κλίμα στο εσωτερικό είναι ενδιάμεσο του μεσογειακού και του μεσοευρωπαϊκού. Στα ορεινά επικρατεί το ορεινό κλίμα<sup>8</sup>.

Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 1000 έως 1200 mm στα παράλια και φτάνει μέχρι τα 2000 mm στα ορεινά τμήματα. Ο αριθμός των ημερών βροχής του έτους κυμαίνεται μεταξύ 10 και 120 και είναι μεγαλύτερος στα παράκτια από ότι στο εσωτερικό του διαμερίσματος. Οι ημέρες χιονοπτώσεων αυξάνουν από τα παράλια προς το εσωτερικό. Η μέση ετήσια νέφωση του διαμερίσματος κυμαίνεται μεταξύ 70 και 75%<sup>8</sup>.

Οι άνεμοι στην περιοχή είναι σχετικά χαμηλοί με την μέση ταχύτητα ανέμου να μην ξεπερνά τα 1,2 m/sec, και η επικρατούσα διεύθυνση είναι η ΝΑ σταθμός Ιωαννίνων<sup>8</sup>.

Ανατολικά – Νοτιοανατολικά της λεκάνης απορροή στον ποταμό Καλαμά βρίσκεται το λεκανοπέδιο των Ιωαννίνων, με έκταση 510 km<sup>2</sup>, το οποίο είναι ένα οροπέδιο ήπιου ανάγλυφου με μέσο υψόμετρο 500 m με κυριότερο υδρογραφικό χαρακτηριστικό τη λίμνη Παμβώτιδα ή Ιωαννίνων. Η λίμνη έχει μήκος 7 km, πλάτος 3 km και καταλαμβάνει έκταση 23 km<sup>2</sup>. Το ύψος της στάθμης της κυμαίνεται από 468,80 m έως 470,70 m, ενώ το μέγιστο βάθος της είναι περίπου 5,00 m<sup>8</sup>.

Μεταξύ των δύο λεκανών υπάρχει υδραυλική επικοινωνία τόσο επιφανειακά όσο και υπόγεια. Επιφανειακά, η λεκάνη Ιωαννίνων παροχετεύει νερά στη λεκάνη Καλαμά μέσω υπερχείλισης της λίμνης Παμβώτιδας προς της πλευρά του Περάματος, όπου υπάρχει θυρόφραγμα. Από το σημείο αυτό ξεκινάει αποστραγγιστική τάφρος, η οποία κατασκευάστηκε το 1956, για την προστασία της λίμνης από πλημμύρες και για την αποστράγγισή της. Η τάφρος αυτή, μήκους 17,1 km και παροχετευτικότητας 40 m<sup>3</sup>/s, οδηγεί τα νερά της υπερχείλισης της λίμνης και της αποστράγγισης της ευρύτερης περιοχής, στη

---

<sup>8</sup> Ευθυμίου, 2007



σήραγγα Λαψίστας, μήκους 4,2 km, η οποία στη συνέχεια εκβάλλει στον παραπόταμο Βελτσίστικο του ποταμού Καλαμά, κοντά στον οικισμό της Κληματιάς του Δήμου Ευρυμεών. Ο Βελτσίστικος συμβάλλει στον ποταμό Καλαμά κοντά στη θέση «Σουλόπουλο»<sup>9</sup>.

### **3.3 Χρήσεις γης στην λεκάνη του Καλαμά**

Η Ήπειρος είναι το ορεινότερο διαμέρισμα της Ελλάδος με τη μεγάλη οροσειρά της Πίνδου και τις διακλαδώσεις της να δεσπόζουν στο μεγαλύτερο τμήμα της έκτασής της.

Οι περιοχές της Ηπείρου όπου υπάρχει αξιόλογη έκταση για καλλιέργεια βρίσκεται στους νομούς Πρέβεζας και Άρτας, μακριά από τη λεκάνη του π. Καλαμά. Συνεπώς, εξαιτίας του ορεινού εδάφους της, δεν υπάρχουν σοβαρές εκτάσεις για καλλιέργεια και έτσι το μεγαλύτερο τμήμα της γης στη λεκάνη του ποταμού Καλαμά χρησιμοποιείται ως βοσκότοπος. Είναι γνωστό άλλωστε ότι η βασική δραστηριότητα των κατοίκων της περιοχής είναι η κτηνοτροφία.

Οι καλλιεργούμενες εκτάσεις και οι περιοχές αγροναπαύσεως κυμαίνονται περί το 15% της συνολικής έκτασης της λεκάνης και καλλιεργούνται κυρίως κατά 44%, με κτηνοτροφικά φυτά (τριφύλλι, μηδική, βρώμη) και δημητριακά, ενώ σε πολύ μικρότερο ποσοστό βρίσκονται και οι δασώδεις εκτάσεις για το νομό Ιωαννίνων και περίπου στο μισό τα δάση για το νομό Θεσπρωτίας.

### **3.4 Χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής της Αρετής<sup>9</sup>**

Η λεκάνη απορροής που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία είναι υπολεκάνη του ποταμού Καλαμά που έχει ως σημείο εξόδου τη θέση Αρετή (γέφυρα Αρετής – υψόμετρο +340 m). Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους έχει ληφθεί από την Ε.Τ.Υ.Μ.Π (Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας) και η ισοδιάσταση του φατνίου είναι 50 m (Σχήμα 3-3). Έχει προέλθει από την ψηφιοποίηση χαρτών της Γεωγραφική Υπηρεσίας Στρατού (ΓΥΣ) κλίμακας 1:50.000.

---

<sup>9</sup> Ευθυμίου, 2007

### 3.4.1 Γεωμετρία

Το σχήμα μιας λεκάνης απορροή είναι πάντα πολύπλοκο, δεν μοιάζει με κανένα από τα απλά γεωμετρικά σχήματα και η περιγραφή του γίνεται με κάποιους αδιάστατους δείκτες που συγκεντρώνουν κάποια πληροφορία για το σχήμα της λεκάνης. Το κυριότερο γεωμετρικό χαρακτηριστικό είναι το εμβαδόν της λεκάνης. Οι υπολογισμοί των τιμών των γεωμετρικών χαρακτηριστικών έχουν γίνει απ' ευθείας από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους.

Το σχήμα της λεκάνης είναι στενόμακρο με διεύθυνση Β-Ν.

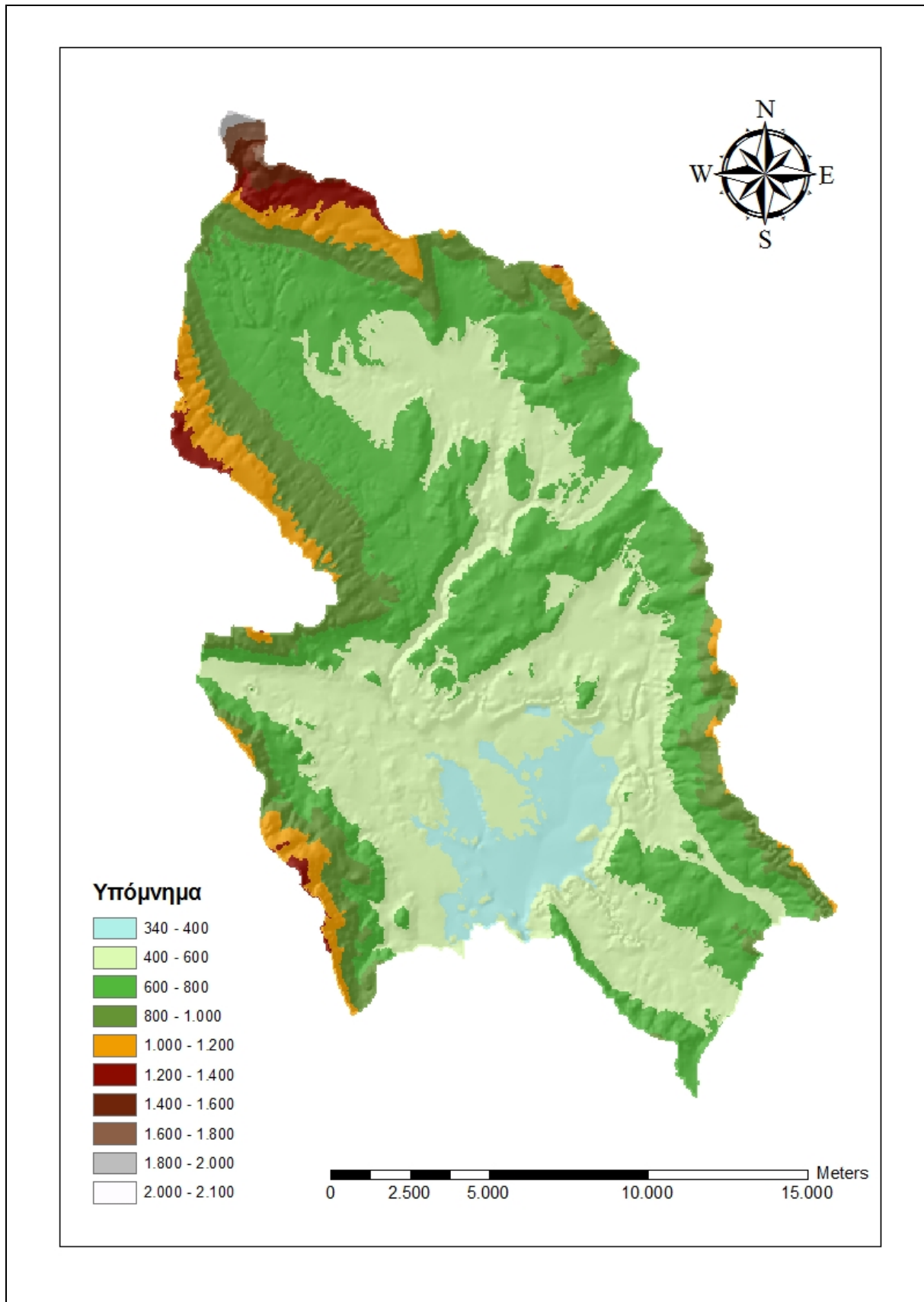
- Εμβαδόν: 345.058.000 m<sup>2</sup> ή 345,06 km<sup>2</sup>
- Περίμετρος: 135.100 m
- Μήκος λεκάνης: 34,2 km
- Μήκος κυρίου υδατορρεύματος: 33,85 km

#### Δείκτες<sup>10</sup>

- Ο δείκτης κυκλικότητας  $E_c$  ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας της λεκάνης προς την επιφάνεια κύκλου με περίμετρο ίδια με αυτή της λεκάνης. Στην υπό μελέτη λεκάνη της Αρετής λαμβάνει την τιμή  $E_c = 0,239$
- Ο δείκτης συμπαγούς  $E'_c$  ορίζεται ως ο λόγος της περιμέτρου της λεκάνης προς την περίμετρο κύκλου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης. Στην υπό μελέτη λεκάνη της Αρετής λαμβάνει την τιμή  $E'_c = 2,05$
- Ο δείκτης επιμήκυνσης ορίζεται ως ο λόγος της πλευράς ενός τετραγώνου με επιφάνεια ίδια με αυτή της λεκάνης προς ένα χαρακτηριστικό μήκος της λεκάνης. Με χαρακτηριστικό μήκος το μήκος του κυρίου υδατορρεύματος, ο δείκτης επιμήκυνσης λαμβάνει την τιμή.  $E_L = 0,549$

---

<sup>10</sup> Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999



**Σχήμα 3-3 Υψομετρική κατανομή λεκάνης Αρετής**

### 3.4.2 Ανάγλυφο

Η γενική εικόνα του ανάγλυφου αποδίδεται από την υψομετρική (ή υψογραφική) καμπύλη της λεκάνης, δηλαδή την καμπύλη που σε κάθε δεδομένη τιμή του τοπογραφικού υψομέτρου  $z$  αντιστοιχίζει το ποσοστό της επιφάνειας της λεκάνης που έχει υψόμετρο μεγαλύτερο ή ίσο της δεδομένης τιμής<sup>11</sup>. Η υψομετρική καμπύλη της λεκάνης της Αρετής, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-4 προέκυψε από την ανάλυση του Ψ.Μ.Ε

Χαρακτηριστικά υψόμετρα της λεκάνης είναι το υψόμετρο εξόδου, το μέγιστο υψόμετρο και το μέσο υψόμετρο. Οι υπολογισμοί των τιμών έχουν γίνει απ' ευθείας από το ΨΜΕ.

- Ελάχιστο υψόμετρο (υψόμετρο εξόδου): + 338,2 m
- Μέγιστο υψόμετρο: + 2100 m
- Μέσο υψόμετρο: + 669 m

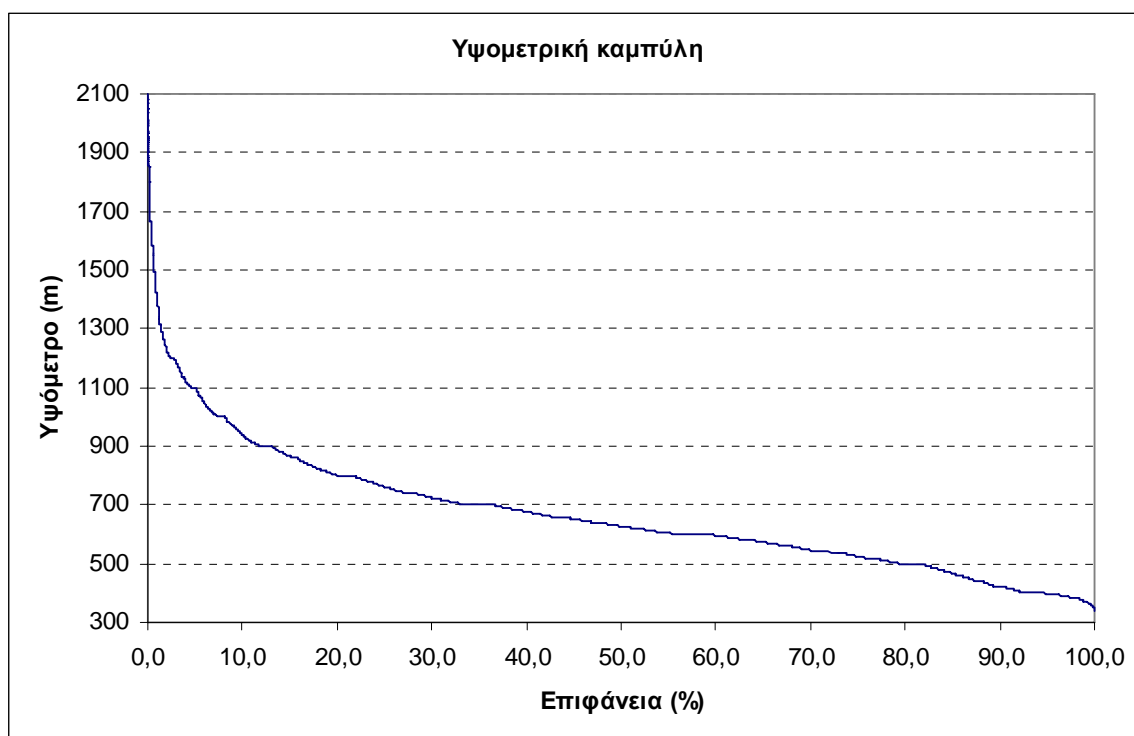
Άλλο ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό είναι η μέση κλίση της λεκάνης. Ο υπολογισμός των κλίσεων είναι αυτοματοποιημένος μέσα στο GIS, και προκύπτει από το ΨΜΕ:

- Ελάχιστη κλίση: 0%
- Μέγιστη κλίση: 166,2%
- Μέση κλίση: 21,3%

---

<sup>11</sup> Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999





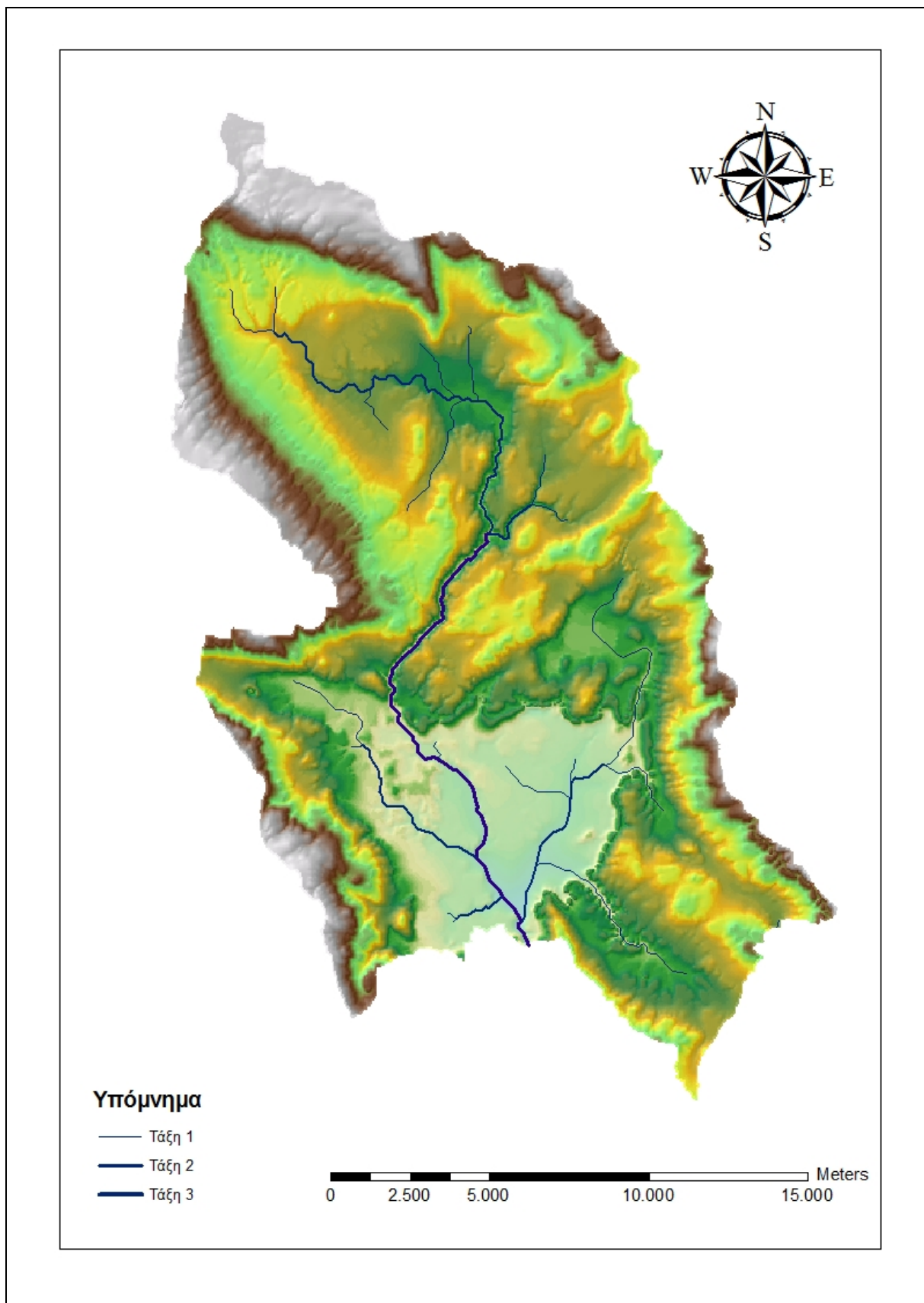
**Σχήμα 3-4 Η υψομετρική καμπύλη της λεκάνης της Αρετής**

### 3.4.3 Υδρογραφικό δίκτυο

Το υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης της Αρετής είναι δενδριτικού τύπου και η κατανομή των κάδων του προέκυψε κατόπιν επεξεργασίας του ΨΜΕ. Για την δημιουργία του υδρογραφικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε κατώφλι 2500 φατνίων (τιμή που προέκυψε από την διαδικασία της ρύθμισης), δηλαδή επιφάνεια εμβαδού  $6,25 \text{ km}^2$ . Κατά την ιεράρχηση κατά Strahler προέκυψαν 3 τάξεις υδρογραφικού δικτύου (Σχήμα 3-5). Το συνολικό μήκος της κάθε τάξης και το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου παρουσιάζεται στον πίνακα 3-1.

Τάξη ρεμάτων	Συνολικό Μήκος (m)
1 <sup>η</sup>	44.080
2 <sup>η</sup>	30.280
3 <sup>η</sup>	16.920
Σύνολο	<b>91.280</b>

**Πίνακας 3-1 Υδρογραφικό δίκτυο ανά τάξεις**



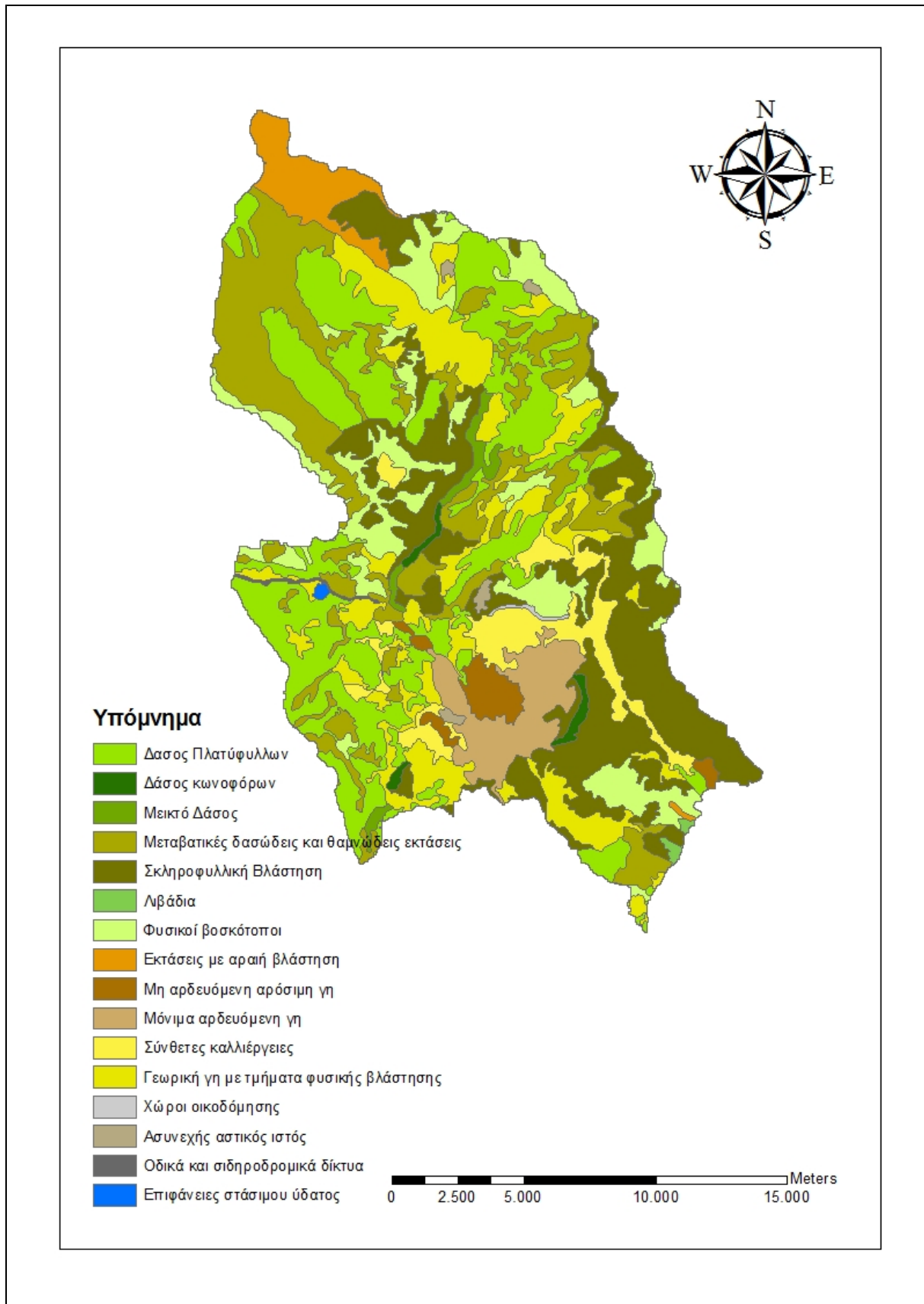
**Σχήμα 3-5 Υδρογραφικό δίκτυο. Ιεράρχηση κατά Strahler**

### 3.4.4 Χρήσεις γης

Ο χάρτης χρήσεων γη προέρχεται από το πρόγραμμα Corine Land Cover 2000 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (Σχήμα 3-6). Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή κωδικοποίηση Corine, η εδαφική κάλυψη στην Ευρώπη κατηγοριοποιείται σε 44 κατηγορίες, χρησιμοποιώντας χάρτες κλίμακα 1:100.000. Οι κατηγορίες που απαντώνται στην λεκάνη της Αρετής είναι 16 (Πίνακας 3-2).

<b>Κατηγορίες χρήσεων γης</b>	<b>Ποσοστό (%)</b>
Δάσος πλατύφυλλων	22,84
Σύνθετες καλλιέργειες	5,01
Δάσος κωνοφόρων	0,63
Χώροι οικοδόμησης	0,11
Ασυνεχής αστικός ιστός	0,42
Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	12,52
Μεικτό δάσος	1,00
Φυσικοί βοσκότοποι	10,42
Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	1,70
Λιβάδια	0,18
Μόνιμα αρδευόμενη γη	4,46
Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	0,18
Σκληροφυλλική βλάστηση	19,89
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	3,28
Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	17,27
Επιφάνειες στάσιμου ύδατος	0,09

**Πίνακας 3-2 Χρήσεις γης στην λεκάνη Αρετής**



Σχήμα 3-6 Χάρτης χρήσεων γης

### 3.4.5 Γεωλογία

Η λεκάνη του ποταμού Καλαμά συνίσταται από ασβεστολιθικά αντίκλινα και σύγκλινα κλασικών ιζημάτων του Φλύσχη και του Βουρδιγαλίου. Τα καρστικά συστήματα της λεκάνης του ποταμού Καλαμά αναπτύσσονται στους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ιονίου Ζώνης. Με βάση τα γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης του ποταμού διακρίνεται ο άνω, μέσο και κάτω ρους.

- Άνω Ρους : Ορίζεται το τμήμα του ποταμού από την αρχή του μέχρι την έξοδό του από την λεκάνη του Παρακαλάμου.
- Μέσος Ρους: Ορίζεται το τμήμα του ποταμού από την γέφυρα του Σουλόπουλου μέχρι το αρδευτικό φράγμα το Καλαμά
- Κάτω Ρους: Ορίζεται το τμήμα του ποταμού από το φράγμα ως τις εκβολές του στο Ιόνιο Πέλαγος.

#### 3.4.5.1 Καρστικά συστήματα λεκάνης Αρετής<sup>12</sup>

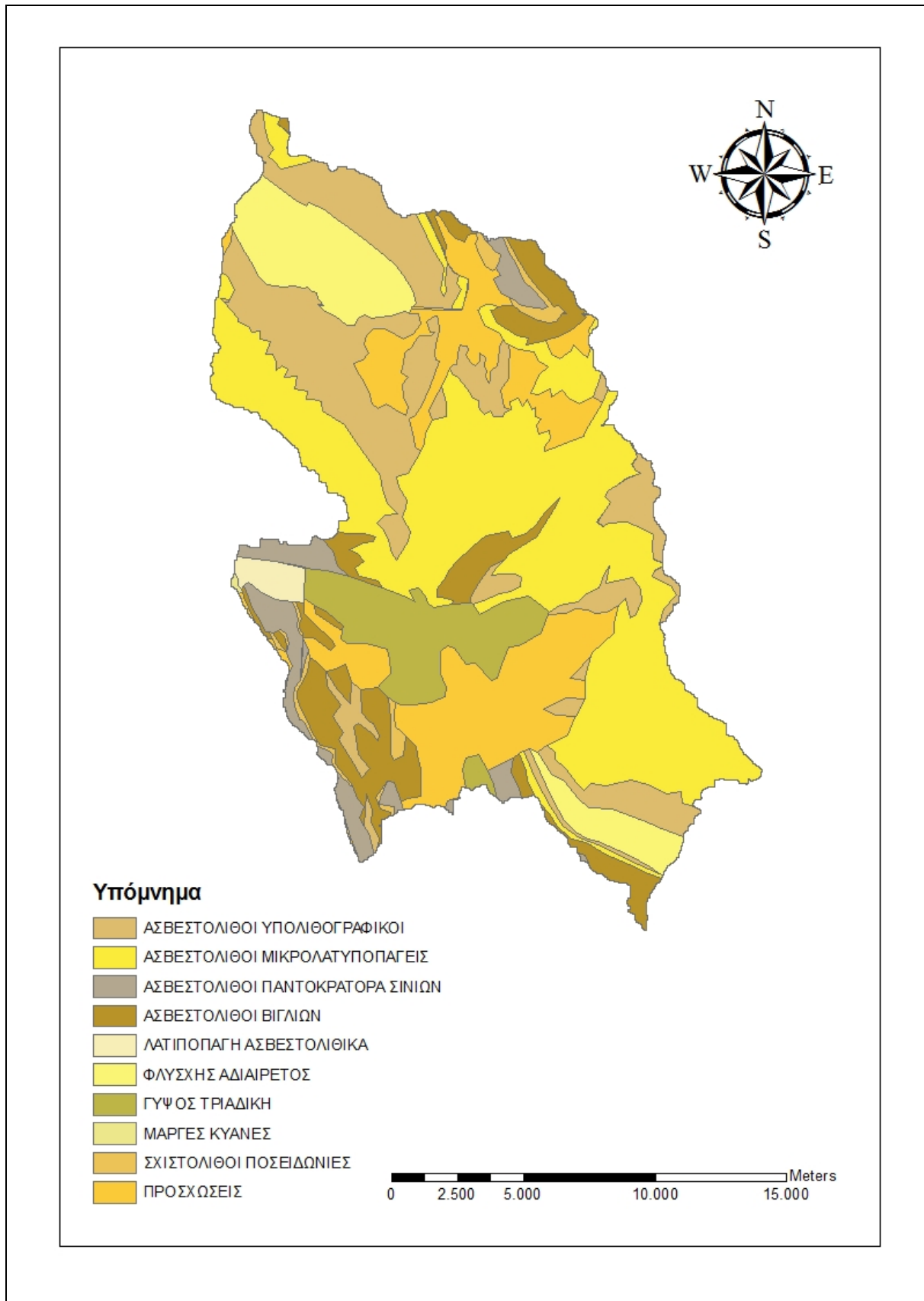
Η γέφυρα της Αρετής βρίσκεται στον άνω του ποταμού Καλαμά. Στη γέφυρα της Αρετής ελέγχονται τα εξής καρστικά συστήματα του άνω ρου:

- Το καρστικό σύστημα Νεμέρσκας που αναπτύσσεται στη βόρεια πλευρά της λεκάνης του Παρακαλάμου με την μεγαλύτερη συμβολή στην τροφοδοσία του άνω ρου (πηγή Γκουρμούτση). Η ίδια λεκάνη του Παρακαλάμου δέχεται και τα νερά του ποταμού Γκόρμου (τροφοδοτείται από τις καρσικές πηγές Γκλάβας, Ωραιοκάστρου, Λίμνης) καθώς και την υπερχειλίση της λίμνης Τζαραβίνας
- Το καρστικό σύστημα του Κασιδιάρη (δυτική πλευρά – Πηγές Σιταρίας, Ιερομνήμη, Κουκίων

Η λεκάνη τροφοδοσίας του είναι περίπου 300 km<sup>2</sup> και η συνολική παροχή τους υπολογίζεται σε 10 m<sup>3</sup>/s.

---

<sup>12</sup> «Σχέδιο Προγράμματος Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Χώρα», ΥΠ.ΑΝ., Αθήνα 2005  
«Μελέτη πιλότος για την διαχείριση των υδατικών πόρων του Υδατικού διαμερίσματος της Ηπείρου», Υ.Β.Ε.Τ., Οκτώβριος 1993  
«Προκαταρκτική έκθεση υδρογεωλογικής μελέτης καρστικών συστημάτων του Υδατικού διαμερίσματος της Ηπείρου», Χ. Σμηρνιώτης



**Σχήμα 3-7 Γεωλογικός χάρτης λεκάνης Καλαμά<sup>13</sup>**

<sup>13</sup> Πηγή: Ινστιτούτου Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.)

## 4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΟΗΣ

Η ροή του νερού στην επιφάνεια του εδάφους διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, την επιφανειακή - χερσαία ροή και την ροή του υδρογραφικού δικτύου. Η επιφανειακή ροή λαμβάνει χώρα σε ολόκληρη την επιφάνεια της λεκάνης απορροής όπου δεν υπάρχει σχηματισμένο υδρογραφικό δίκτυο. Η ροή αυτή είναι ροή με μικρές παροχές και χαμηλές ταχύτητες και σχηματίζεται κατά την διαδρομή κάθε σταγόνας νερού πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, μέχρι αυτή να καταλήξει σε κάποιο υδατόρρευμα. Η ροή που σχηματίζεται στο υδρογραφικό δίκτυο είναι ροή με μεγαλύτερες ταχύτητες και μεγαλύτερες παροχές και διέπεται από διαφορετικούς φυσικούς νόμους, σε σχέση με την επιφανειακή ροή, καθώς μέσα στα υδατορρέυματα απορρέει το σύνολο του επιφανειακού νερού και οι όγκοι του νερού που απορρέουν είναι άλλης τάξης μεγέθους.

### 4.1 Προσδιορισμός παροχών

Για την δημιουργία του μοντέλου θεωρείται η ταχύτητα του υδρογραφικού δικτύου ως σταθερή. Ως συνέπεια αυτής της παραδοχής προκύπτει η παραδοχή σταθερής παροχής στο χρόνο, για κάθε σημείο του υδρογραφικού δικτύου. Η παροχή αυτή επιλέχθηκε να είναι η μέση παροχή το πόταμου στο κάθε σημείο του. Προκύπτει ως το πηλίκο του συνολικού όγκου που απορρέει στο σημείο προς τον χρόνο απορροής (Εξίσωση 1). Ο όγκος του απορρεύσιμου νερού προκύπτει από το ύψος της ενεργού βροχόπτωσης επί την επιφάνεια της ανάντη, απορρεύσιμης στο σημείο αυτό, υπολεκάνης.

$$Q_i = \frac{V_i}{t_{ci}} = \frac{P_e \times A_i}{t_{ci}} \quad [1]$$

Όπου:

$Q_i$  = Παροχή στο σημείο (-φατνίο)  $i$  ( $m^3/s$ )

$V_i$  = Όγκος απορροής ( $m^3$ )

$t_{ci}$  = Χρόνος συρροής υπολεκάνης  $i$  (s)

$P_e$  = Ύψος ενεργού βροχόπτωσης (m)

$A_i$  = Επιφάνεια υπολεκάνης  $i$  ( $m^2$ )

Ο αρχικός προσδιορισμός του χρόνου συρροής  $t_c$ , του συνόλου της λεκάνης απορροής, μπορεί να γίνει με διάφορες εμπειρικές σχέσεις, με συνηθέστερη την σχέση Giandotti (Εξίσωση 2). Ο τελικός υπολογισμός του χρόνου συρροής προκύπτει μέσα από την διαδικασία της ρύθμισης (calibration) .

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{\Delta H}} \quad [2]$$

Όπου:

$t_c$  = Χρόνος συρροής (hr)

$A$  = Επιφάνεια λεκάνης απορροής ( $\text{km}^2$ )

$L$  = Μήκος κύριου υδατορρεύματος (km)

$\Delta H$  = Η διαφορά μεταξύ του μέσου υψομέτρου λεκάνης από το υψόμετρο στην έξοδο (m).

Το μήκος, η επιφάνεια απορροής και η διαφορά μεταξύ του μέσου υψομέτρου λεκάνης από το υψόμετρο στην έξοδο, προκύπτουν από την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

Ο χρόνος συρροής στο κάθε φατνίο  $t_{ci}$  επιλέχθηκε να προκύπτει αναλογικά με την επιφάνεια της ανάντη απορρεύσιμης υπολεκάνης. Επειδή, όμως, οι ταχύτητες ροής στις μικρές-ανάντη υπολεκάνες είναι μικρότερες σε σχέση με τις ταχύτητες ροής που δημιουργούνται στο σχηματισμένο υδρογραφικό δίκτυο όπου συγκεντρώνεται το σύνολο του νερού ο χρόνος συρροής στις μικρές υπολεκάνες δεν είναι ευθέως ανάλογος της επιφάνειάς τους αλλά πλησιάζει περισσότερο της μορφή του σχήματος 4-1, όπου ο χρόνος συρροής είναι ανάλογος της επιφάνειας υψωμένης σε δύναμη  $1/\alpha$  (Εξίσωση 3), με  $\alpha \geq 1$  ώστε να προκύπτει η συγκεκριμένη μορφή παραβολικής καμπύλης (τα κοίλα προς τα πάνω).

$$t_{ci} = kA_i^{\frac{1}{\alpha}}, \quad \text{με } \alpha \geq 1 \quad [3]$$

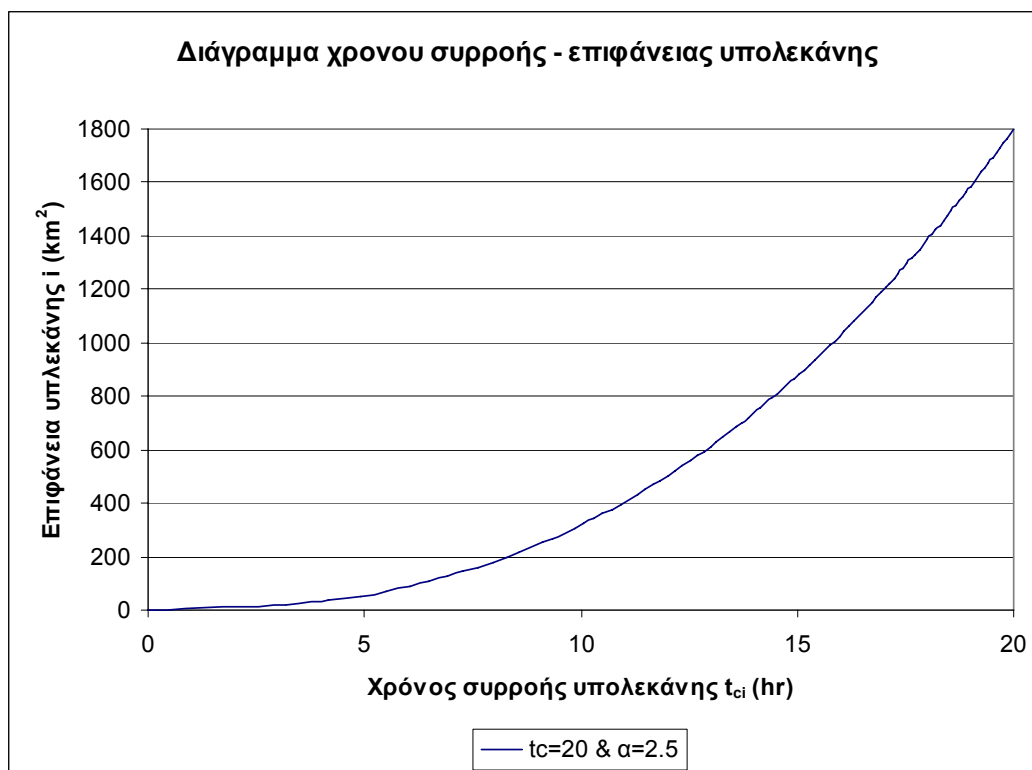
Όπου:

$t_{ci}$  = Χρόνος συρροής υπολεκάνης  $i$  (s)

$A_i$  = Επιφάνεια υπολεκάνης  $i$  ( $\text{m}^2$ )

$k$  = συντελεστής





**Σχήμα 4-1** Ενδεικτικό διάγραμμα χρόνου συρροής υπολεκάνης – επιφάνειας υπολεκάνης

Για την εύρεση του συντελεστή  $k$  εφαρμόζεται στην εξίσωση το ζεύγος τιμών ( $A_{\lambda\epsilon\kappa}$ ,  $t_c$ ) το οποίο επαληθεύει την εξίσωση και προκύπτει ότι:

$$k = \frac{t_c}{(A_{\lambda\epsilon\kappa})^{1/\alpha}} \quad [4]$$

Από την εξίσωση [4] η εξίσωση [3] γίνεται:

$$t_{ci} = t_c \left( \frac{A_i}{A_{\lambda\epsilon\kappa}} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad \text{με } \alpha \geq 1 \quad [5]$$

Κατά την διαδικασία της ρύθμισης προέκυψε η τελική τιμή του συντελεστή  $\alpha = 1$  (δηλαδή  $k=t_c/A_{\lambda\epsilon\kappa}$ )<sup>1</sup> και του χρόνου συρροής  $t_c = 15$  sec. Με την παραπάνω διαδικασία

<sup>1</sup> Βλέπε παράγραφο 4.4

προκύπτει ο τελικός κλίμακος ταχυτήτων όπου χρησιμοποιείται κατά τον υπολογισμό της ταχύτητας ροής υδρογραφικού δικτύου.

## 4.2 Ταχύτητα επιφανειακής - χερσαίας ροής<sup>2</sup>

Χερσαία ή επιφανειακή ροή ονομάζεται η ροή που σχηματίζεται στην επιφάνεια του εδάφους, εκτός υδρογραφικού δικτύου. Ο υπολογισμός των ταχυτήτων της χερσαίας ροής γίνεται με τον συνδυασμό της μεθόδου κινηματικού κύματος και της εξίσωσης Manning. Το βάθος ροής, σε κατάσταση ισορροπίας, σύμφωνα με τους Overton & Meadows (1976) δίνεται από την εξίσωση [6]:

$$y = \left( \frac{i_e n x}{\sqrt{S_o}} \right)^{0.6} \quad [6]$$

Όπου:

$y$  = βάθος ροής σε κατάσταση ισορροπίας (m)

$i_e$  = ένταση ενεργού βροχόπτωσης (m/s)

$n$  = συντελεστής Manning

$x$  = μήκος ροής (m)

$S_o$  = κλίση (m/m)

Το βάθος ροής σε κατάσταση ισορροπίας συνδυάζεται με τη εξίσωση Manning για τον υπολογισμό της ταχύτητας χερσαίας ροής (εξίσωση [7]):

$$V_o = \frac{(i_e x)^{0.4} S_o^{0.3}}{n^{0.6}} \quad [7]$$

Όπου:

$V_o$  = ταχύτητα ροής (m/s)

Το μήκος ροής  $x$  εκτιμάται ως η απόσταση του κάθε φατνίου από τον πλησιέστερο υδροκρίτη. Για τα φατνία όπου ανήκουν στον υδροκρίτη η απόσταση θεωρείται σταθερή και

---

<sup>2</sup> Kilgore, 1997 & Δέρβος, 2005

ίση με 30 m, που είναι περίπου ο μέσος όρος των μηκών 25 και 35,4 m, δηλαδή ο μέσο όρος των μηκών ροής στο φατνίο αν η διεύθυνση είναι παράλληλη στις πλευρές ή στις διαγώνιους του φατνίου (ισοδιάσταση φατνίου 50 m). Οι τιμές των μηκών ροής προκύπτουν από την επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, με την εντολή flow length, όπου επιλέγεται ο υπολογισμός του μήκους ροής ανάντη του κάθε φατνίου (upstream distance).

Η ένταση της ενεργού βροχόπτωσης είναι σταθερή και επιλέγεται από τον χρήστη. Στην παρούσα εργασία η ένταση της ενεργού βροχόπτωσης έλαβε την τιμή 5 mm κατά την διαδικασία της ρύθμισης.

Αντίθετα, η κλίση του κάθε φατνίου του υδρογραφικού δικτύου προκύπτει από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους με την διαδικασία από Spatial Analyst: Surface → slope όπου εισαγόμενο δεδομένο είναι μόνο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, αφού πρώτα έχει διορθωθεί με την εντολή Hydrology → fill, η οποία γεμίζει τα βυθίσματα μέχρι το ελάχιστο υψόμετρο των ορίων τους, ώστε να προκύψει ένα υδρολογικά ορθό ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

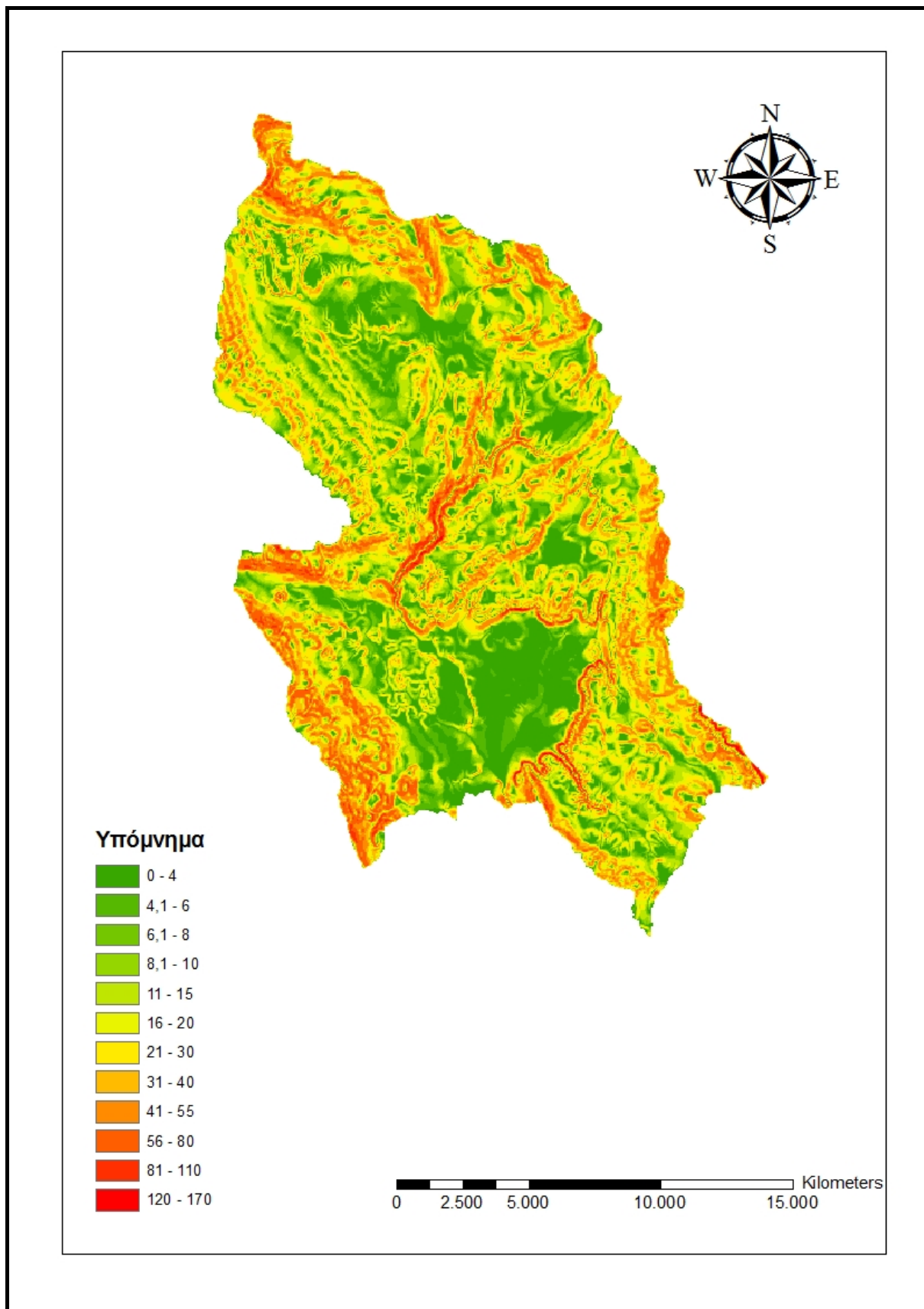
Αναφορικά με τους συντελεστές τραχύτητας Manning (n), προκύπτουν βάση του κανάβου των χρήσεων γης της υπό μελέτη περιοχής. Ανάλογα με την κάθε χρήση, ορίστηκαν τιμές του συντελεστή Manning αντλώντας ορισμένα δεδομένα από την βιβλιογραφία. Οι συντελεστές που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1.

	<b>Κατηγορίες χρήσεων γης</b>	<b>Land cover</b>	<b>Συντελεστής Manning</b>
1	Ασυνεχής αστικός ιστός	Discontinuous urban fabric	0,015
2	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	Land principally occupied by agriculture, with significant a	0,1
3	Δάσος κωνοφόρων	Coniferous forest	0,2
4	Δάσος πλατύφυλλων	Broad-leaved forest	0,2
5	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	Sparsely vegetated areas	0,1
6	Επιφάνειες στάσιμου ύδατος <sup>3</sup>	Water bodies	0,08
7	Λιβάδια <sup>3</sup>	Pastures	0,1
8	Μεικτό δάσος	Mixed forest	0,2
9	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	Transitional woodland shrub	0,2
10	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	Non-irrigated arable land	0,1
11	Μόνιμα αρδευόμενη γη	Permanently irrigated land	0,1
12	Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα <sup>4</sup>	Roads and Rails	0,02
13	Σκληροφυλλική βλάστηση	Sclerophyllous vegetation	0,2
14	Σύνθετες καλλιέργειες	Complex cultivation patterns	0,1
15	Φυσικοί βοσκότοποι <sup>3</sup>	Natural grassland	0,046
16	Χώροι οικοδόμησης	Construction sites	0,015

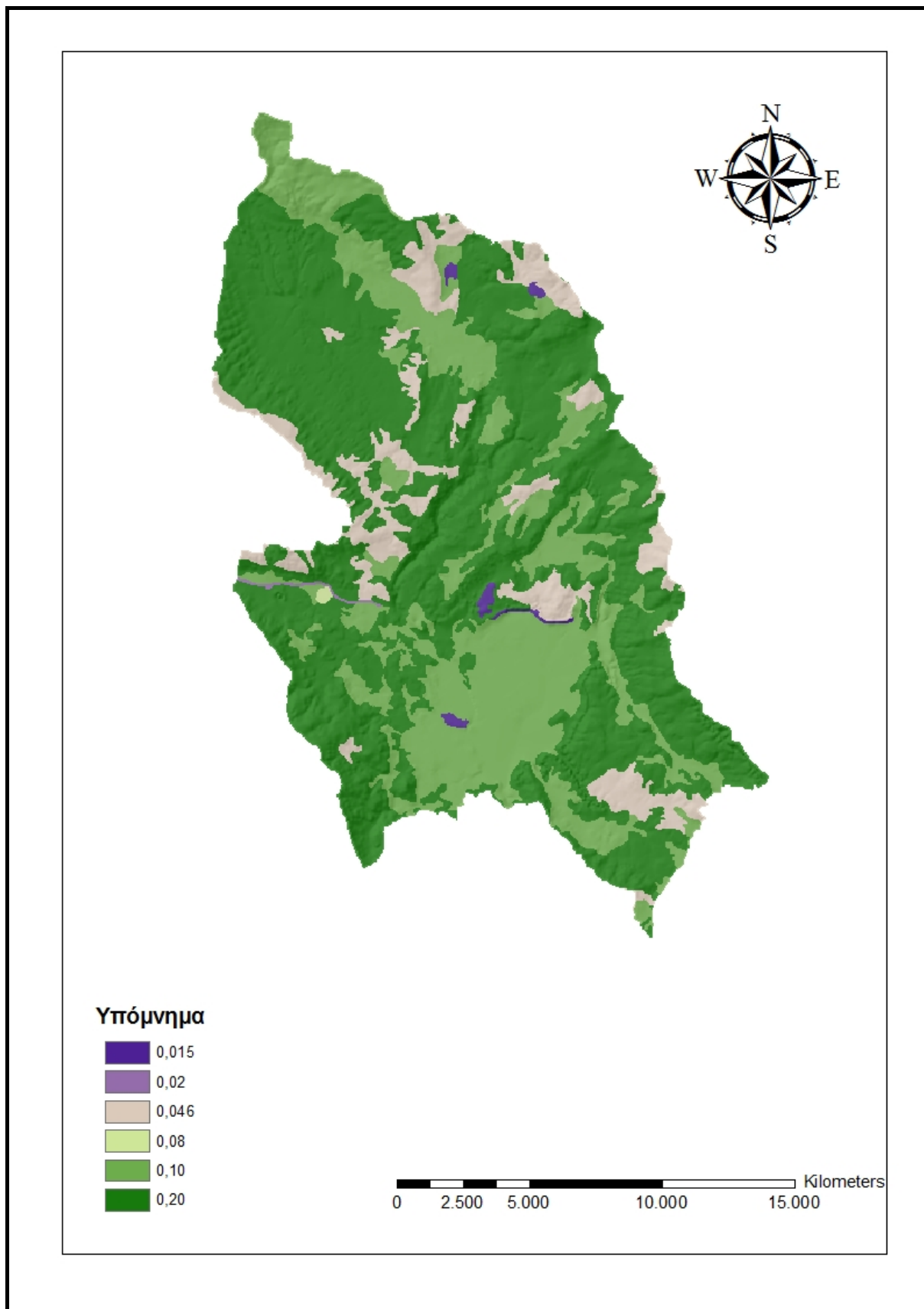
**Πίνακας 4-1 Συντελεστές τραχύτητας**

<sup>3</sup> Barter & King (1976)

<sup>4</sup> Engman (1986)



Σχήμα 4-2 Κάναβος κλίσεων (%)



**Σχήμα 4-3 Συντελεστές τραχύτητας Manning**

### 4.3 Ταχύτητα ροής υδρογραφικού δικτύου

#### 4.3.1 Μεθοδολογία υπολογισμού ταχύτητας ροής Υδρογραφικού Δικτύου

Ο υπολογισμός της ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου έγινε βάση της εξίσωσης Manning. Η ροή στο υδρογραφικό δίκτυο προσομοιώθηκε με ροή σε κανάλι τραπεζοειδούς διατομής πλάτους 2 m με πλευρικές κλίσεις 1,75 : 1 (Ο:Κ). Η τραχύτητα του υδρογραφικού δικτύου προσομοιώθηκε με συντελεστή Manning  $n = 0,05$  (Brater and King, 1976).

Για τον υπολογισμό της ταχύτητας έγινε η παραδοχή ομοιόμορφης ροής στο υδρογραφικό. Συνεπώς, η ταχύτητα ροής σε κάθε φατνίο υδρογραφικού δικτύου προκύπτει από την παροχή  $Q$ , την γεωμετρία του καναλιού, τον συντελεστή τραχύτητας Manning  $n$  και την κλίση του κάθε φατνίου  $J$ .

Πριν, όμως, από τον υπολογισμό της ταχύτητας χρειάζεται να υπολογιστεί το ομοιόμορφο βάθος ροής ως ρίζα της εξίσωσης<sup>5</sup> [8],

$$Q = \frac{\sqrt{S}}{n} \frac{((b + zy)y)^{5/3}}{(b + 2y\sqrt{1 + z^2})^{2/3}} \quad [8]$$

Όπου:

$Q$  = παροχή ( $m^3/s$ )

$S$  = κλίση καναλιού

$n$  = συντελεστής Manning

$b$  = πλάτος καναλιού (m)

$z$  = πλευρική κλίση

$y$  = βάθος ροής (m)

Το ομοιόμορφο βάθος ροής  $y_0$  ως ρίζα της παραπάνω εξίσωσης δεν μπορεί να υπολογιστεί άμεσα παρά μόνο με μεθόδους διαδοχικών προσεγγίσεων. Αυτό απαιτεί την δημιουργία προγράμματος που θα υπολογίζει το ομοιόμορφο βάθος για κάθε φατνίο χωριστά, κάτι που δεν μπορούσε να γίνει στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Για τον λόγο αυτό, έγινε η προσπάθεια να δημιουργηθεί ένας εμπειρικός τύπος υπολογισμού του

---

<sup>5</sup> Kilgore, 1997

βάθους ροής. Για την καλύτερη προσομοίωση της ταχύτητας ροής στο υδρογραφικό δίκτυο ο τύπος αυτός επιλέχθηκε να περιέχει όλες τις παραμέτρους που καθορίζουν το ομοιόμορφο βάθος ροής (παροχή, κλίση, τραχύτητα, γεωμετρία).

Η κλίση του κάθε φατνίου του υδρογραφικού δικτύου προκύπτει από τον κλίση κλίσεων, όπως υπολογίστηκε κατά την διαδικασία υπολογισμού ταχύτητας χερσαίας ροής.

Για την εύρεση της παροχής κάθε φατνίου του υδρογραφικού δικτύου γίνεται η παραδοχή ότι αυτή είναι ανεξάρτητη του χρόνου, όπως έγινε και κατά τον υπολογισμό της χερσαίας ροής. Η παραδοχή σταθερής παροχής, ανεξάρτητης του χρόνου σε κάθε φατνίο του υδρογραφικού δικτύου είναι μια επιβεβλημένη απλοποίηση για να θεωρηθεί σταθερή η ταχύτητα του υδρογραφικού δικτύου στο χρόνο, και να καταστεί δυνατή η δημιουργία του μοντέλου. Η τιμή της παροχής του κάθε φατνίου υπολογίζεται με την διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 4.1.

Έχοντας ως δεδομένη την κλίση και την παροχή, υπολογίζεται το βάθος ροής  $y_0$  (ομοιόμορφο βάθος) βάση ενός μοντέλου που αναπτύχθηκε και περιγράφεται παρακάτω. Στη συνέχεια, από την εξίσωση [9] υπολογίζεται η ταχύτητα υδρογραφικού δικτύου για κάθε φατνίο, όπου πλάτος καναλιού  $b = 2$  m και πλευρική κλίση  $z = 1,75$ .

$$V = \frac{Q}{E} = \frac{Q}{(by + zy^2)} \quad [9]$$

Όπου:

$V$  = ταχύτητα ροής (m/s)

$Q$  = παροχή ( $m^3/s$ )

$E$  = επιφάνεια

$b$  = πλάτος καναλιού (m)

$z$  = πλευρική κλίση

$y$  = βάθος ροής (m)

#### 4.3.2 Δημιουργία μοντέλου υπολογισμού βάθους ροής υδρογραφικού δικτύου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η ροή στο υδρογραφικό δίκτυο προσομοιώθηκε με τη ροή σε κανάλι τραπεζοειδούς διατομής πλάτους 2 m με πλευρικές κλίσεις 1,75 : 1 (Ο:Κ) και η τραχύτητα του προσομοιώθηκε με συντελεστή Manning  $n = 0,05$ . Με δεδομένη την

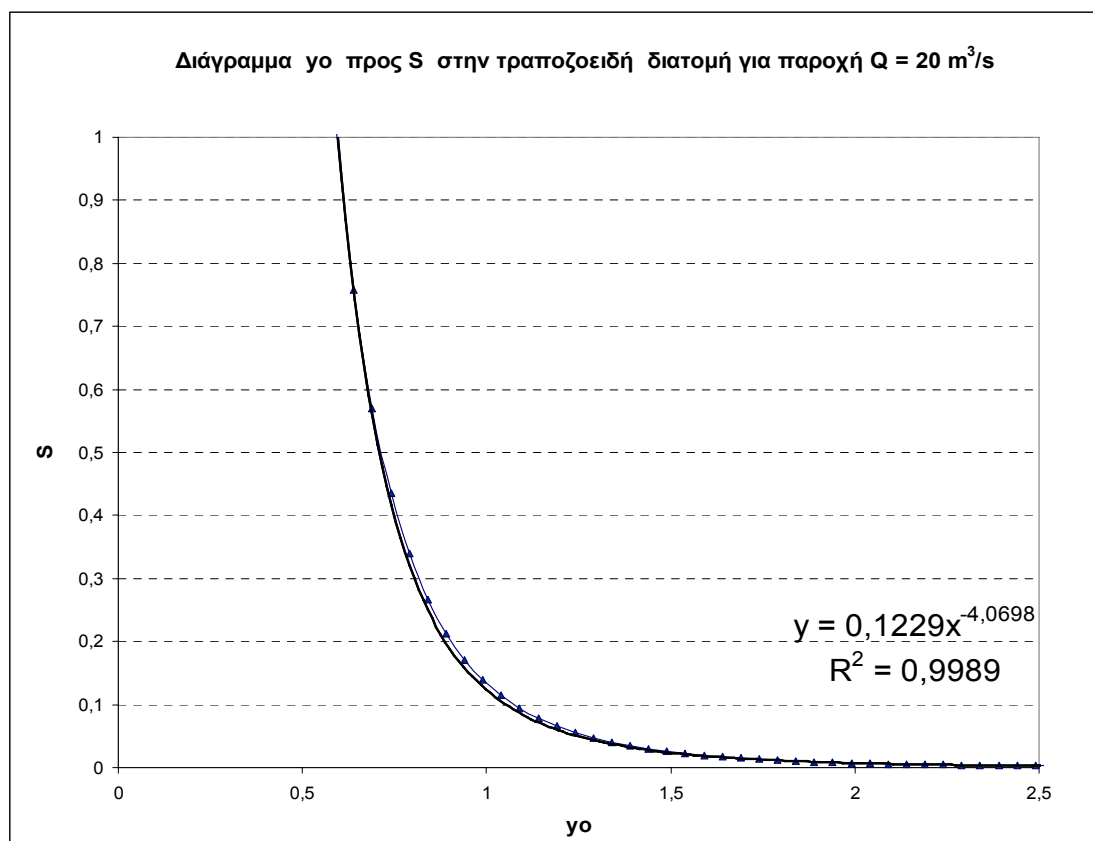


γεωμετρία και την τραχύτητα έγινε η προσπάθεια να κατασκευαστεί μια εμπειρική εξίσωση που να υπολογίζει το βάθος ομοιόμορφης ροής με ανεξάρτητες μεταβλητές την παροχή Q και την κλίση S όπου είναι διαφορετικές για κάθε φατνίο.

Αρχικά, λύθηκε η εξίσωση [8] ως προς την κλίση S.

$$S = \left( \frac{Q \times n (b + 2y\sqrt{1+z^2})^{2/3}}{((b + zy)y)^{5/3}} \right)^2 \quad [10]$$

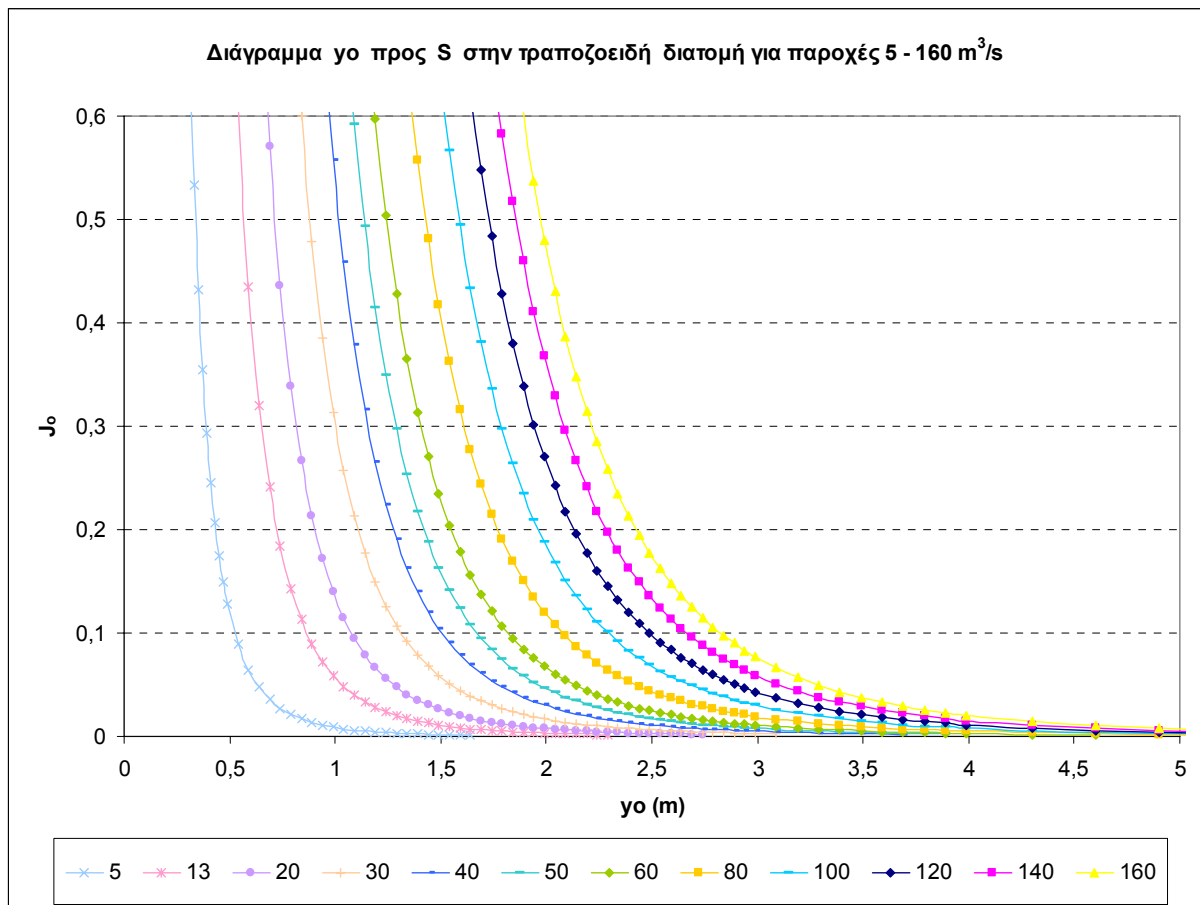
Ύστερα έγινε επίλυση της εξίσωσης για πολλά διαφορετικά βάθη ροής y, έχοντας σταθερή κάποια τιμή παροχής. Από αυτή τη διαδικασία προκύπτει ένα διάγραμμα της παρακάτω μορφής (Σχήμα 4-4).



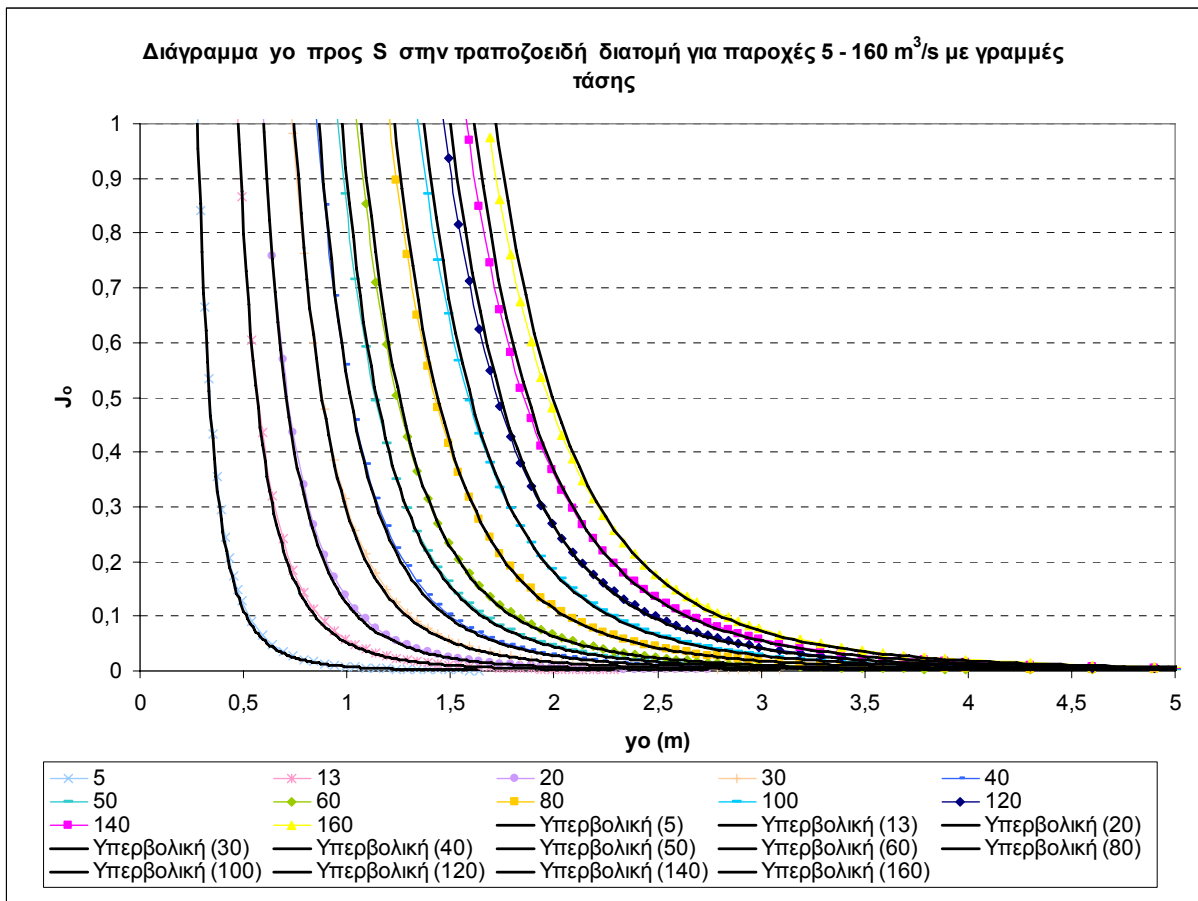
**Σχήμα 4-4 Διάγραμμα  $y_0$  προς S**

Στη γραφική παράσταση που προέκυψε προσαρμόστηκε επιτυχώς μια συνάρτηση δύναμης. Η συνάρτηση δύναμης, που είναι της μορφής  $y=ax^{-b}$ , σχεδόν ταυτίστηκε, όπως υποδηλώνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα  $R^2$  που ξεπερνά το 0,99 ( $R^2 = 0,9989$ ).

Η παραπάνω διαδικασία επανελήφθη για αρκετές διαφορετικές τιμές παροχών από 5 m<sup>3</sup>/s έως 160 m<sup>3</sup>/s (Σχήμα 4-5).



Στην κάθε γραφική παράσταση προσαρμόστηκε επίσης μια συνάρτηση δύναμης της μορφής  $y = ax^{-b}$  (Σχήμα 4-6).



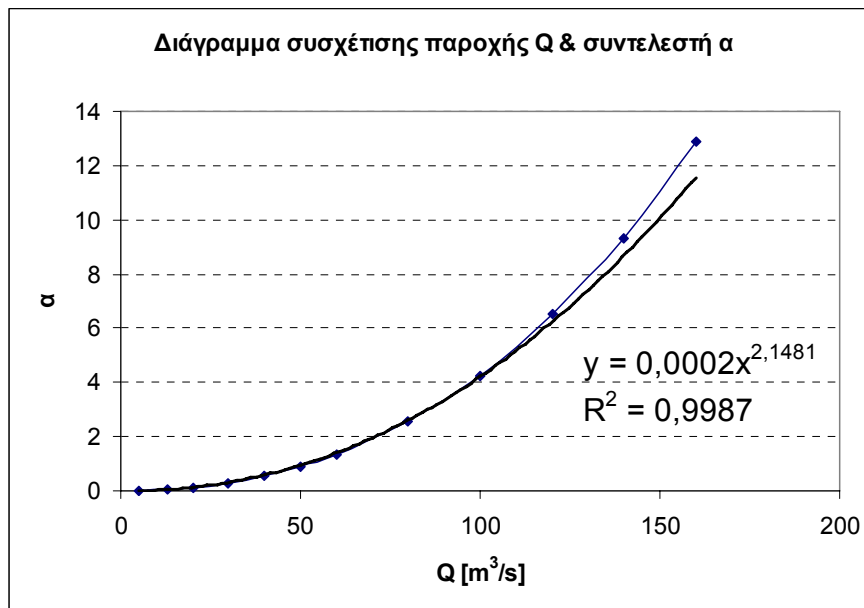
**Σχήμα 4-6 Διάγραμμα  $y_0$  προς  $J_0$  με γραμμές τάσης**

Τα αποτελέσματα της προσαρμογής και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα παρουσιάζονται στον πίνακα 4-2.

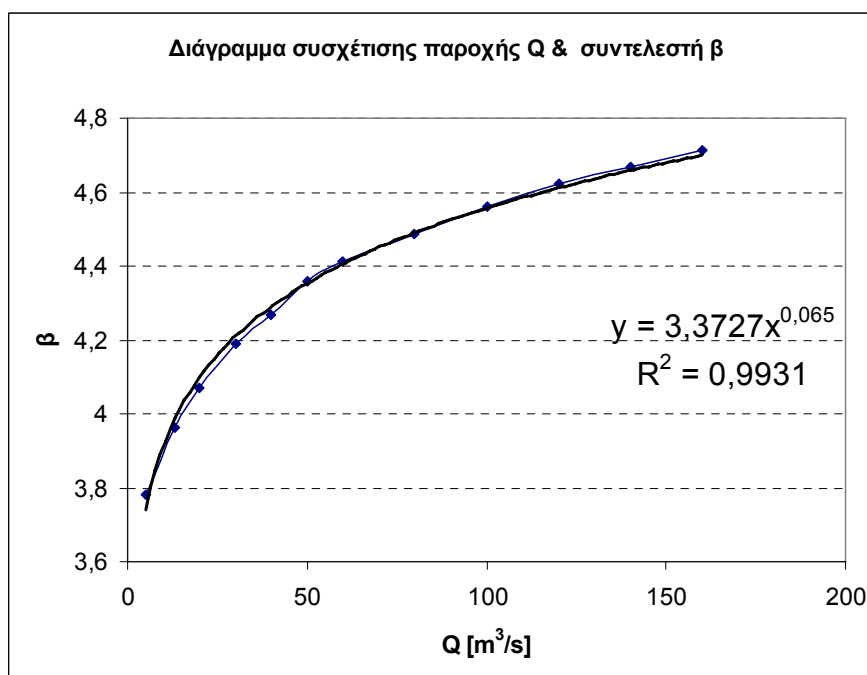
**Πίνακας 4-2**

Q	$y = \alpha x^{-\beta}$	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
5	$y = 0,008x^{-3,7828}$	0,008	3,7828	0,9991
13	$y = 0,0516x^{-3,9635}$	0,0516	3,9635	0,999
20	$y = 0,1229x^{-4,0698}$	0,1229	4,0698	0,9989
30	$y = 0,2909x^{-4,1879}$	0,2909	4,1879	0,9991
40	$y = 0,5364x^{-4,276}$	0,5364	4,267	0,9991
50	$y = 0,8994x^{-4,3581}$	0,8994	4,3581	0,9994
60	$y = 1,347x^{-4,4121}$	1,347	4,4121	0,9994
80	$y = 2,547x^{-4,4868}$	2,547	4,4868	0,9993
100	$y = 4,2424x^{-4,5617}$	4,2424	4,5617	0,9993
120	$y = 6,516x^{-4,6246}$	6,516	4,6246	0,9994
140	$y = 9,3365x^{-4,6686}$	9,3365	4,6686	0,9995
160	$y = 12,887x^{-4,7143}$	12,887	4,7143	0,9996

Είναι προφανές, από τον προηγούμενο πίνακα, ότι η συνάρτηση δύναμης προσαρμόζει τις γραφικές παραστάσεις με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια, σχεδόν ταύτιση ( $R^2 > 0,99$ ). Η διαφορά της κάθε καμπύλης, δηλαδή των καμπυλών διαφορετικών παροχών  $Q$ , είναι στους συντελεστές  $\alpha$  &  $\beta$  της συνάρτησης. Οι συντελεστές αυτοί απεικονίστηκαν σε γραφικά διαγράμματα συναρτήσεως της παροχής (Σχήμα 4-7 & 4-8) ώστε να ερευνηθεί πιθανή συσχέτιση τους με τις τιμές των παροχών.



Σχήμα 4-7 Διάγραμμα συσχέτισης παροχής Q & συντελεστή α



Σχήμα 4-8 Διάγραμμα συσχέτισης παροχής Q & συντελεστή β

Στα διαγράμματα αυτά έγινε προσαρμογή συναρτήσεων δύναμης τόσο για το διάγραμμα παροχής Q και συντελεστή α, όσο και για το διάγραμμα παροχής Q και συντελεστή β, όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα. Η συσχέτιση είναι πάρα πολύ υψηλή και στα 2 διαγράμματα ( $R^2 = 0.9987$  &  $0.9931$ ).

Συνεπώς, ο τελικός εμπειρικός τύπος που προκύπτει για την εύρεση του βάθους ροής (ομοιόμορφο βάθος) συναρτήσει της παροχής και της κλίσης, με δεδομένη την γεωμετρία και την τραχύτητα που προαναφέρθηκε, είναι η εξίσωση [11], και προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική κατάσταση στο υπό μελέτη κανάλι.

$$y_0 = \left( \frac{S}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}}, \quad [11]$$

$$\text{με } \alpha = 200 \times 10^{-6} \times Q^{2,1481}$$

$$\& \beta = 3,3727 \times Q^{0,065}$$

Όπου:

$y_0$  = ομοιόμορφο βάθος ροής (m)

Q = παροχή ( $m^3/s$ )

S = κλίση καναλιού

#### 4.3.3 Διόρθωση μοντέλου στις περιοχές με μηδενική κλίση

Το μοντέλο, όπως προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία παρουσιάζει αδυναμία υπολογισμού ταχύτητας ροής όταν η κλίση είναι μηδενική. Στην πραγματικότητα η ροή σε περιοχές με μηδενική κλίση δεν μπορεί να είναι ομοιόμορφη (δεν ισχύει η παραδοχή που έχει τεθεί) αλλά καθορίζεται η ροή από ανάντη και κατάντη. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα τίθεται στις περιοχές με μηδενική κλίση μια πολύ μικρή κλίση 1%. Με τον νέο κλίση, το μοντέλο υπολογίζει, στα φατνία με μηδενική κλίση, ταχύτητες ροής, οι οποίες προφανώς είναι μικρές αλλά όχι μηδενικές.

#### **4.4 Σφάλματα από παραδοχές & απλοποιήσεις**

Κατά την δημιουργία μοντέλου υπολογισμού ταχυτήτων ροής έγιναν αρκετές παραδοχές και απλοποιήσεις, όπως έχουν ήδη αναφερθεί, οι οποίες επηρεάζουν η καθεμιά χωριστά τα αποτελέσματα. Η αποφυγή των παραδοχών και των απλοποιήσεων θα καθιστούσε το υπό ανάπτυξη μοντέλο αρκετά πολύπλοκο, απαιτητικό σε δεδομένα τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα, και χρονοβόρο ως προς τον προγραμματισμό του και την εκτέλεση του. Επίσης, θα απαιτούσε ειδικές γνώσεις σε προγραμματισμό. Παρ' όλα αυτά, η βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων, ενός πιο αναλυτικού μοντέλου, είναι αρκετά αμφίβολη. Κι αυτό, γιατί θα ήταν απαραίτητο να γίνουν άλλες, και ίσως περισσότερες, απλοποιήσεις και παραδοχές στα μη διαθέσιμα δεδομένα.

Αρχικά, η απλοποίηση ότι η κοίτη του ποταμού προσομοιώνεται με κανάλι τραπεζοειδούς διατομής σταθερών διαστάσεων και τραχύτητας είναι μια απλούστευση που πρέπει να γίνει: πρώτον, για να μπορέσει να εφαρμοστεί μια απλή μέθοδος εύρεσης του βάθους ροής και δεύτερον, γιατί για να βρεθεί η πραγματική κατάσταση την κοίτης του υδρογραφικού θα έπρεπε να γίνει χαρτογράφηση για το σύνολο το μήκους του, εργασία που είναι πολύ ακριβή και έξω από τα πλαίσια της παρούσης μεταπτυχιακής εργασίας. Εντούτοις, και με ενδεχόμενη χαρτογράφηση της κοίτης του υδρογραφικού δικτύου η εύρεση του βάθους ροής σε κάθε σημείο του είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, με την οποία ασχολούνται εξειδικευμένα προγράμματα. Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζονται τα αποτελέσματα από την παραπάνω απλοποίηση είναι δύσκολο να προσδιοριστεί.

Δεύτερη σημαντική παραδοχή είναι η θεώρηση σταθερής ταχύτητας του υδρογραφικού δικτύου. Η παραδοχή αυτή γίνεται ώστε να προκύψει ένα μοντέλο που θα εφαρμόζεται σε λεκάνη απορροής, με τελικό αποτέλεσμα την δημιουργία ισόχρονων καμπυλών από τις οποίες θα προκύπτει το πλημμυρογράφημα. Ως συνέπεια, προέκυψε η παραδοχή σταθερής παροχής στο χρόνο, για κάθε σημείο του υδρογραφικού δικτύου. Η παροχή αυτή επιλέχθηκε να είναι η μέση παροχή το πόταμου στο κάθε σημείο του. Ο επηρεασμός των αποτελεσμάτων αναμένεται να είναι σημαντικός, και αυτό γιατί η παροχή ενός υδρογραφικού δικτύου αλλάζει τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Στην παρούσα εργασία έγινε η προσπάθεια να συμπεριληφθεί στο μοντέλο η χωρική διαφοροποίηση της παροχής. Δεν κατέστη, όμως, εφικτό να γίνει το ίδιο και με την χρονική διακύμανσή της. Ως συνέπεια της παραδοχής αυτής, αναμένεται ένα ομαλοποιημένο προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα, δηλαδή με

μικρότερη παροχή αιχμής από την πραγματική και με μεγαλύτερες παροχές στην αρχή και στο τέλος του πλημμυρικού επεισοδίου από τις πραγματικές.

Τρίτη σημαντική παραδοχή είναι η θεώρηση ενιαίας διαμορφωμένης διατομής για όλο το μήκος του υδρογραφικού δικτύου, ανεξάρτητα από την τάξη των κλάδων του υδατορρεύματος. Επίσης, στον υπολογισμό του χρόνου συρροής του κάθε φατνίου ο συντελεστής  $\alpha$  έλαβε την τιμή 1, πράγμα που σημαίνει ότι ο χρόνος συρροής είναι ευθύς ανάλογος με την απορρεύσιμη επιφάνεια, όσον αφορά το υδρογραφικό δίκτυο. Πιθανόν, το αποτέλεσμα αυτό να είναι απόρροια την θεώρησης ενιαίας διατομής υδρογραφικού δικτύου. Ο συντελεστής αυτός θα μπορούσε να εξεταστεί αν έχει νόημα σε εκτενέστερο υδρογραφικό δίκτυο όπου οι ταχύτητες ροής των κλάδων μικρής τάξης παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές από τις αντίστοιχες ταχύτητες στους κλάδους μεγαλύτερων τάξεων υδρογραφικού δικτύου.

Ακόμα ένα σημείο που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι το μοντέλο έχει την δυνατότητα να υπολογίσει ταχύτητες υδρογραφικού δικτύου για σταθερή ένταση βροχόπτωσης, η οποία, μάλιστα, προκύπτει από την διαδικασία της ρύθμισης. Αυτό γίνεται για την εξαγωγή συνθετικού μοναδιαίου πλημμυρογραφήματος. Δεν εξετάστηκε κατά πόσο το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί με εντάσεις πραγματικών ενεργών βροχοπτώσεων ώστε με άθροιση σύμφωνα με τις αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος να προκύψει ένα πλημμυρογράφημα άμεσα συγκρίσιμο με το πραγματικό – παρατηρημένο.

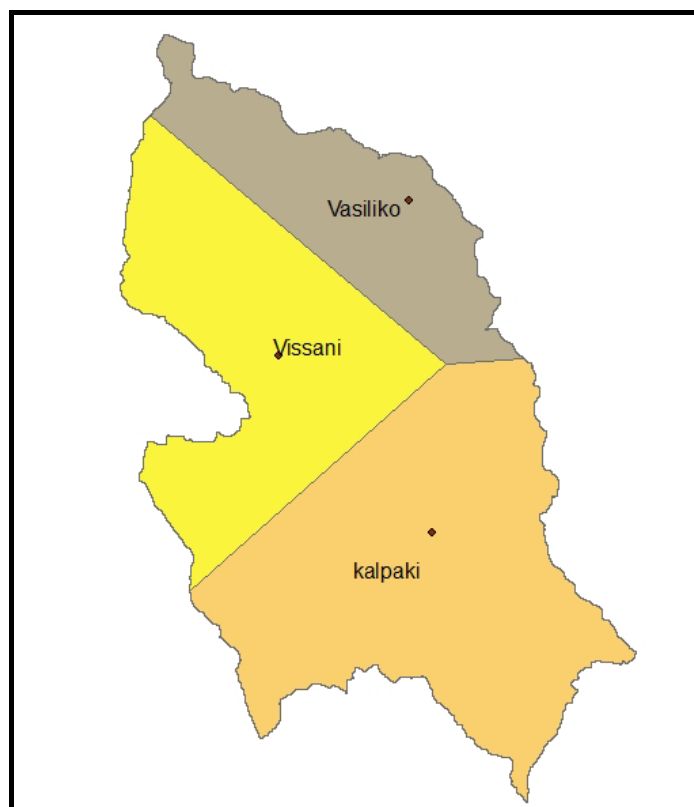
## 5 ΕΠΕΙΣΟΔΙΑ ΒΡΟΧΗΣ

### 5.1 Δεδομένα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον Τομέα Υδρολογίας της Δ/σης Ανάπτυξης Υδροηλεκτρικών Έργων (ΔΑΥΕ) της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ). Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 3 βροχομετρικούς σταθμούς: τον σταθμό Βασιλικού, τον σταθμό Βήσσανης και τον σταθμό Καλπακίου (Πίνακας 5-1).

Σταθμός	Υψόμετρο	X	Y
Βασιλικό	747	209203	4434043
Βήσσανη	789	203527	4427316
Καλπάκι	396	209920	4420575

Πίνακας 5-1 Βροχομετρικοί Σταθμοί



Σχήμα 5-1 Θέσεις βροχομετρικών σταθμών και πολύγωνα Thiessen



Επίσης χρησιμοποιήθηκαν μετρημένες απορροές στην γέφυρα Αρετής όπως προέκυψαν από επεξεργασία των σταθμημετρικών δεδομένων και της διατομής την κοίτης στη Γέφυρα Αρετής. Από αυτά προέκυψε η καμπύλη στάθμης παροχής και από της καμπύλη στάθμης παροχής προέκυψε η χρονοσειρά παροχών που χρησιμοποιήθηκε.

Όλα τα δεδομένα είναι σε χρονικό βήμα 1 hr. Η επεξεργασία και διόρθωση τόσο των βροχομετρικών δεδομένων όσο και των σταθμημετρικών έγινε από τον Ι.Παναγόπουλο.

## **5.2 Επεισόδια βροχής – απορροής**

Για τον υπολογισμό των συνθετικών υδρογραφημάτων επιλέχθηκαν 4 επεισόδια βροχής με βάση τα εξής κριτήρια:

- Στην απορροή του επεισοδίου δεν υπάρχει συμβολή νερού που να οφείλεται σε τήξη χιονόπτωσης
- Ελάχιστο ύψος καθαρής βροχόπτωσης του επεισοδίου 4 mm
- Ανάμεσα σε 2 διαφορετικά επεισόδια βροχής μεσολαβεί διάστημα τουλάχιστον 6 hr χωρίς βροχόπτωση. Επίσης σε επεισόδια όπου πριν τις 6 hr είχε σημειωθεί βροχόπτωση, η βροχόπτωση αυτή είναι πολύ μικρή σε ένταση.
- Τα επεισόδια που επιλέχθηκαν είναι επεισόδια με, κατά το δυνατόν, συνεχή βροχόπτωση αρκετών ωρών, όπου και οι μέγιστες εντάσεις παρατηρούνται κατά το δυνατόν συγκεντρωμένες σε συνεχόμενες ώρες και όχι επεισόδια όπου η βροχόπτωση σταματάει κάποιες ώρες και μετά συνεχίζει.
- Επίσης, τα επεισόδια που επιλέχθηκαν παρουσιάζουν παρατηρημένο υδρογράφημα με αρκετά σαφή διαχωρισμό πλημμυρικής – βασικής απορροής, και με σχήμα που να προσεγγίζει την τριγωνική μορφή.

Τα επεισόδια αυτά είναι:

- 30/11/1990 – 3/12/1990: Το επεισόδιο αυτό είναι αρκετά εκτεταμένο σε διάρκεια με μικρές έως μέτριες εντάσεις βροχής. Παρατηρούνται 2 μεγαλύτερες αιχμές πλημμύρας και μία μικρότερη. Δεδομένα βροχής υπάρχουν μόνο από τον σταθμό στο Βασιλικό και η επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνη θεωρήθηκε ίση με την βροχόπτωση του

σταθμού. Στο επεισόδιο αυτό υπάρχουν δυο διαστήματα όπου σταματάει η βροχή, μετά τις 2 μεγαλύτερες αιχμές.

- 6/12/1990 – 7/12/1990: Το επεισόδιο αυτό είναι συντομότερο αλλά παρουσιάζει αξιόλογο ύψος βροχής ( $h = 58 \text{ mm}$  σε 35 hr). Και στο επεισόδιο δεδομένα βροχής υπάρχουν μόνο από τον σταθμό στο Βασιλικό και η επιφανειακή βροχόπτωση της λεκάνης θεωρήθηκε ίση με την βροχόπτωση του σταθμού. Κατά τον υπολογισμό της ενεργού βροχοπτώσεως θεωρήθηκε αρχική κατακράτηση μικρότερη από την βροχόπτωση που παρατηρείται μέχρι την έναρξη της άμεση απορροής. Αυτό, γιατί θεωρήθηκε πως η υγρασία της λεκάνης είναι αυξημένη λόγω προηγούμενης βροχόπτωσης λίγες ώρες νωρίτερα από το επεισόδιο. Στην ενέργεια αυτή οδήγησε η σύγκριση του συνθετικού υδρογραφήματος με το πραγματικό. Η αιχμή που παρατηρείται είναι μία.
- 10/12/1990 - 11/12/1990 : Το συγκεκριμένο επεισόδιο είναι πολύ μικρής διάρκειας σε σχέση με τα προηγούμενα αλλά με πολύ μεγάλη ένταση καθώς παρατηρείται και ένταση 17 mm/hr. Το υδρογράφημα είναι τριγωνική μορφής με δύο αιχμές σχεδόν ίδιας παροχής και η μία πολύ κοντά στην άλλη. Μπορούν να θεωρηθούν ως ενιαία αιχμή. Ο σταθμός από τον οποίο υπήρχαν δεδομένα είναι και εδώ μόνο ο σταθμός στο Βασιλικό.
- 30/11/1993 - 1/12/1993 : Το επεισόδιο αυτό έχει διάρκεια κύριας βροχόπτωσης (όπου δηλαδή παρατηρούνται μεγάλες εντάσεις) περίπου 20hr στις οποίες οι βροχομετρικοί σταθμοί έχουν καταγράψει εντάσεις μέχρι και 10 mm/hr. Το προηγούμενο επεισόδιο βροχόπτωσης απέχει 24 hr. Δεδομένα βροχόπτωσης υπάρχουν και από τους 3 σταθμούς. Η επιφανειακή ολοκλήρωση έγινε με την μέθοδο Thiessen (Πίνακας 5-2).

Σταθμός	Συντελεστή βάρους μεθόδου Thiessen
Βασιλικό	0,21
Βήσσανη	0,33
Καλπάκι	0,46

**Πίνακας 5-2 Συντελεστές βάρους μεθόδου Thiessen**

### 5.3 Τρόπος εκτίμησης ενεργού βροχόπτωσης

Για την εκτίμηση την ενεργού βροχόπτωσης από παρατηρημένα βροχομετρικά δεδομένα έχουν προταθεί αρκετοί μέθοδοι εκτίμησης με επικρατέστερες την μέθοδο του δείκτη Φ και την μέθοδο του SCS (Soil Conservation Service).

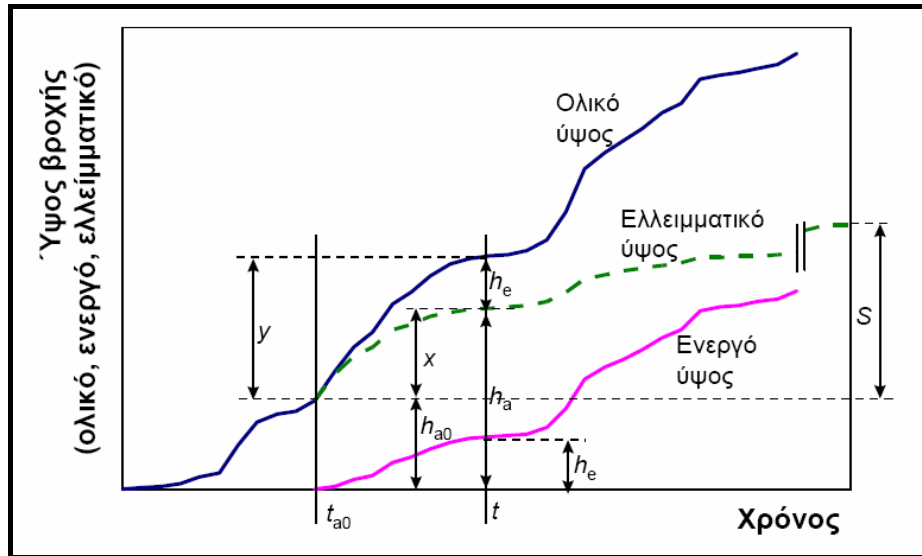
Σύμφωνα με τον Δέρβο (2005) ο οποίος εφάρμοσε και τις δυο μεθόδους για την εκτίμηση της ενεργού βροχόπτωσης σε πραγματικά επεισόδια βροχής, τα συνθετικά υδρογραφήματα που προέκυψαν με την μέθοδο του SCS (σε συνδυασμό με συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα που προέκυψε από την μέθοδο χρόνου – επιφάνειας) , προσεγγίζουν καλύτερα τα παρατηρημένα υδρογραφήματα από εκείνα που προέκυψαν με την μέθοδο του δείκτη Φ. Κατόπιν τούτου σε αυτή την εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος SCS για τον «καθαρισμό» των βροχοπτώσεων.

Η μέθοδος SCS στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές<sup>1</sup>:

- Σε ένα χρονικό διάστημα  $t_{a0}$  όλη η πραγματική (ακαθάριστη) βροχόπτωση, συνολικού ύψους  $h_{a0}$  μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε έλλειμμα (αρχικό έλλειμμα), χωρίς να δίνει καθόλου ενεργή βροχόπτωση. Κατά συνέπεια, μετά το χρόνο  $t_{a0}$  το μέγιστο ενεργό ύψος βροχής  $h_e$  δεν μπορεί να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος ( $y = h - h_{a0}$ ), όπου  $h$  το ολικό (ακάθαρτο) ύψος βροχής.
- Το επιπλέον, πέραν του αρχικού  $h_{a0}$ , ελλειμματικό ύψος που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια βροχόπτωση με μεγάλο ολικό ύψος  $h$  δεν μπορεί να ξεπεράσει μία μέγιστη τιμή  $S$ , γνωστή ως δυνητικά μέγιστη κατακράτηση (potential maximum retention).
- Σε κάθε χρονική στιγμή μετά το χρόνο  $t_{a0}$ , οι λόγοι του ενεργού ύψους βροχής  $h_e$  και του ελλειμματικού ύψους μείον το αρχικό έλλειμμα ( $x = h_a - h_{a0}$ ), προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ( $y$  και  $S$ , αντίστοιχα) είναι ίσοι (Εξίσωση<sup>1</sup> [1] & Σχήμα 5-2).

$$\frac{h_e}{y} = \frac{x}{S} \quad \text{ή} \quad \frac{h_e}{h - h_{a0}} = \frac{h_a - h_{a0}}{S} \quad [1]$$

<sup>1</sup> Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1993



Σχήμα 5-2 Μέθοδος SCS<sup>2</sup>

Αντικαθιστώντας στην [1] το  $h_a = h - h_e$  και λύνοντας ως προς  $h_e$  προκύπτει η εξίσωση<sup>2</sup> [2]:

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq h_{a0} \\ \frac{(h - h_{a0})^2}{h - h_{a0} + S} & h > h_{a0} \end{cases} \quad [2]$$

Όπου:

- $h_e$       συνολικό ενεργό ύψος βροχής (mm)
- $h$         ολικό ύψος βροχόπτωσης (mm)
- $h_{a0}$      αρχική κατακράτηση
- $S$         δυνητικά μέγιστη κατακράτηση

Η αρχική κατακράτηση  $h_{a0}$  οφείλεται σε παρεμπόδιση, διήθηση και επιφανειακή αποθήκευση που συμβαίνουν πριν την έναρξη της απορροής. Στην παρούσα εργασία έλαβε την τιμή του ύψους βροχή μέχρι την έναρξη της άμεση απορροής (εκτός από ένα επεισόδιο βροχής όπου θεωρήθηκε ότι η αρχική κατακράτηση πρέπει να είναι μικρότερη καθώς η λεκάνη είχε αυξημένη υγρασία λόγω προηγούμενη βροχόπτωσης 7 hr νωρίτερα).

<sup>2</sup> Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1993

Έχοντας γνωστό το τελικό ενεργό ύψος από τα παρατηρημένα υδρογραφήματα και θέτοντας την αρχική κατακράτηση  $h_{a0}$  όπως περιγράφηκε παραπάνω, επιλέγεται η τιμή  $S$  (μετά από δοκιμές) έτσι ώστε η εξίσωση [2] να δίνει συνολικό ενεργό ύψος όσο το παρατηρημένο – τελικό ενεργό ύψος.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Υπολογίζεται το αθροιστικό ύψος βροχόπτωσης  $h$  από της χρονοσειρά των βροχοπτώσεων
- Εφαρμόζεται η εξίσωση [2] για κάθε χρονικό βήμα και προκύπτει το αθροιστικό ενεργό ύψος βροχής για κάθε χρονικό βήμα.
- Από το αθροιστικό ενεργό ύψος βροχής προκύπτει το τμηματικό από την διαφορά μεταξύ του αθροιστικού ενεργού ύψους του τέλους του κάθε χρονικού βήματος από το αθροιστικό ενεργό ύψος στην αρχή του χρονικού βήματος.
- Τέλος η ενεργός ένταση βροχόπτωσης προκύπτει από την ενεργό βροχόπτωση. Στην παρούσα εργασία, η ένταση και η βροχόπτωση λαμβάνουν την ίδια τιμή αφού το χρονικό βήμα είναι 1 hr.

t	ΟΛΙΚΟ		ΚΑΘΑΡΟ	
	Τμηματικό h (mm)	Αθροιστικό h (mm)	Αθροιστικό h <sub>e</sub> (mm)	Τμηματικό h <sub>e</sub> (mm)
0	0,85	0,85	0,0	0,00
1	3,35	4,20	0,0	0,00
2	3,92	8,11	0,0	0,00
3	6,34	14,46	0,0	0,00
4	16,98	31,44	3,5	3,46
5	0,00	31,44	3,5	0,00
6	1,04	32,48	3,8	0,39
7	2,88	35,36	5,0	1,16
8	0,02	35,38	5,0	0,01
9	0,02	35,39	5,0	0,01
10	0,02	35,41	5,0	0,01
11	0,02	35,43	5,0	0,01
12	0,02	35,45	5,0	0,01
13	0,02	35,47	5,0	0,01
14	0,02	35,48	5,1	0,01
15	0,02	35,50	5,1	0,01
16	0,02	35,52	5,1	0,01
17	0,02	35,54	5,1	0,01
18	0,24	35,78	5,2	0,10
19	0,00	35,78	5,2	0,00
20	0,03	35,81	5,2	0,01
21	0,00	35,81	5,2	0,00
22	0,01	35,82	5,2	0,00
23	0,24	36,06	5,3	0,10
24	0,71	36,77	5,6	0,31

Πίνακας 5-3 Παράδειγμα υπολογισμού ενεργού ύψους βροχόπτωσης με την μέθοδο SCS

## 6 ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 6.1 Εκτέλεση μοντέλου

Η όλη διαδικασία υπολογισμού του ιστογράμματος χρόνου επιφάνειας έλαβε χώρα αποκλειστικά και μόνο σε περιβάλλον GIS. Για να επιτευχθεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία υπολογισμού, χρησιμοποιήθηκε το Arc Toolbox. Δημιουργήθηκε ένα καινούριο toolbox με το όνομα ISOCHRONES. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν έξι μοντέλα (models), μέσα στο toolbox ISOCHRONES μέσα από τον ModelBuilder. Τα μοντέλα δομήθηκαν έτσι ώστε να μπορούν να εκτελεστούν διαδοχικά αφού κάθε επόμενο μοντέλο χρησιμοποιεί ως δεδομένα τα αποτελέσματα των προηγούμενων.

Τα μοντέλα αυτά είναι:

- (1) *Streams* : Χρησιμοποιεί ως δεδομένο εισόδου το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM). Ανάλογα το αριθμό φατνίων – κατώφλι που θα του θέσει ο χρήστης, σχηματίζει το υδρογραφικό δίκτυο και ύστερα το ιεραρχεί.
- (2) *Qstream* : Χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου τους κανάβους του προέκυψαν από το μοντέλο streams καθώς και το DEM. Ο χρήστης καλείται να επιλέξει το ύψος της βροχόπτωσης, το χρόνο συρροής και τον συντελεστή  $a$  (βλ. παράγραφο 4.1). Υπολογίζει τον κানাβο παροχών υδρογραφικού δικτύου.
- (3) *Vstreams*: Χρησιμοποιεί το διορθωμένο DEM και τον κানাβο παροχών υδατορρεύματος και υπολογίζει τον κানাβο ταχυτήτων υδρογραφικού δικτύου.
- (4) *Vland* : Χρησιμοποιεί ως δεδομένο εισόδου τον κানাβο διεύθυνσης ροής και τον κানাβο τραχυτήτων Manning. Από το χρήστη ζητείται να καθορίσει το μήκος ροής φατνίων υδροκρίτη και την ένταση της βροχόπτωσης.
- (5) *Vtotal*: Συνδυάζει τις ταχύτητες χερσαίας ροής και ροής υδατορρεύματος και υπολογίζει τον τελικό κানাβο ταχυτήτων ροής.
- (6) *Accum Time*: Από τον τελικό κানাβο ταχυτήτων ροής υπολογίζει το ιστογράμμα χρόνου επιφάνειας. Τα αποτελέσματα είναι σε πίνακα και μπορούν να εξαχθούν σε αρχείο .dbf όπου είναι εκτελέσιμο από το Excel.

## 6.2 Ρύθμιση μοντέλου - αποτελέσματα

Για την ρύθμιση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα 2 από τα 4 επεισόδια (επεισόδια βροχής 30/11/1990 – 3/12/1990 & 6/12/1990 – 7/12/1990). Τα άλλα 2 χρησιμοποιήθηκαν για επαλήθευση. Η στατιστική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε είναι το σχετικό σφάλμα. Η τιμή που βελτιστοποιήθηκε είναι η αιχμή της πλημμύρας, δηλαδή εξετάστηκαν οι παράμετροι για τις οποίες μέσο σχετικό σφάλμα (ΜΣΦ) της εκτιμημένης αιχμής πλημμύρας ελαχιστοποιείται. Αναλυτικότερα, η στατιστική επεξεργασία περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο.

Κατά την διαδικασία της ρύθμισης οι παράμετροι που εξετάστηκαν είναι:

- Το κατώφλι – αριθμός φατνίων απορροής για τον σχηματισμό υδρογραφικού δικτύου. Έλαβε την τιμή 2500.
- Ο χρόνος συρροής  $t_c$ : Επιλέχθηκε η τιμή 15 hr γιατί ανταποκρίνεται η τιμή αυτή με την τιμή χρόνου συρροής που προκύπτει από το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα.
- Συντελεστής  $\alpha$ : Έλαβε τελικώς την τιμή 1.
- Ένταση βροχόπτωσης: Λαμβάνεται υπ' όψη στον υπολογισμό της χερσαίας ροής. Έλαβε την τιμή 5mm/h

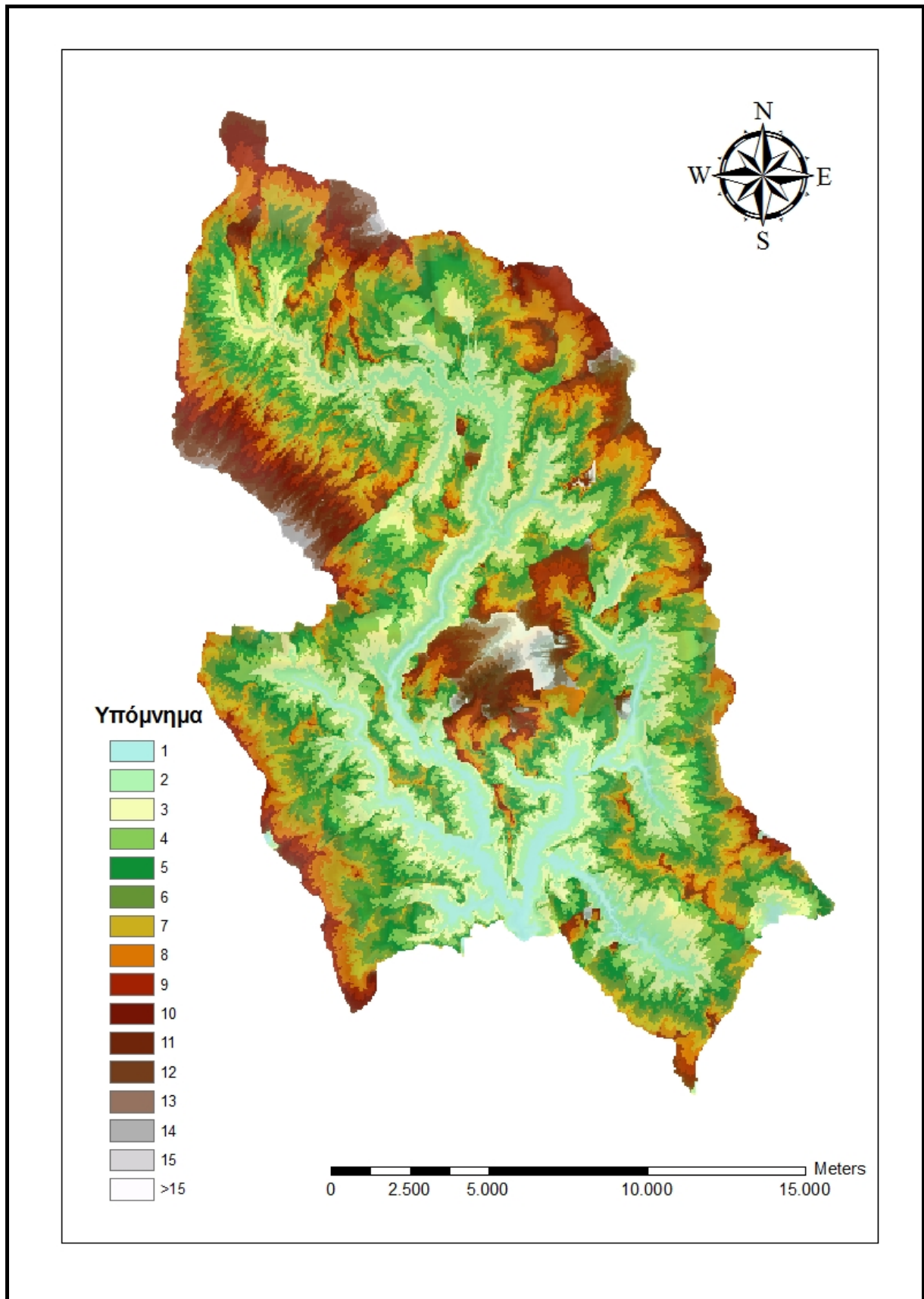
Δεν εξετάστηκε, κατά τη ρύθμιση, το ύψος βροχόπτωσης, καθώς τέθηκε 10 mm αφού η επιδίωξη ήταν ο σχηματισμός συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Από την τελική επιλογή των παραμέτρων προέκυψε ο χάρτης ισόχρονων καμπυλών (Σχήμα 6-1). Παρατηρείται ότι τα φατνία που καθυστερούν να απορρεύσουν βρίσκονται στο κέντρο της λεκάνης, σε περιοχή με μέτριο υψόμετρο. Το ιστόγραμμα που προκύπτει παρουσιάζεται στον Πίνακα 6-1 και το Σχήμα 6-2.

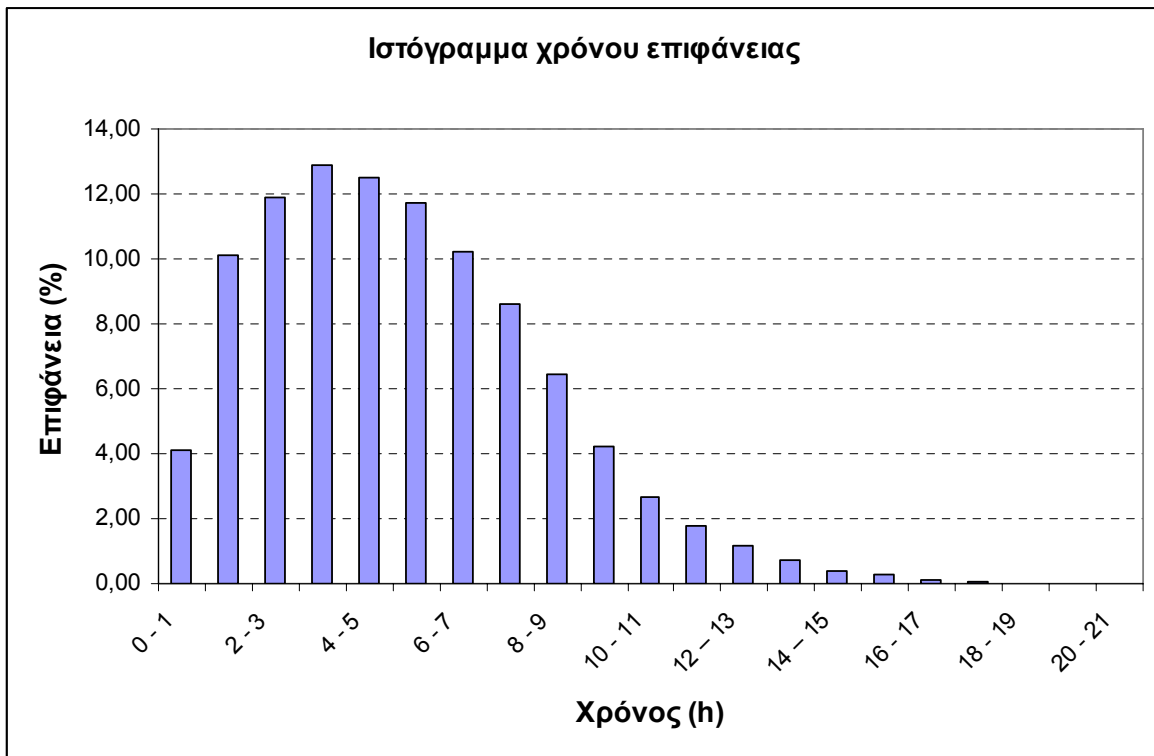
<b>Χρόνος (h)</b>	<b>Επιφάνεια (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Επιφάνεια (%)</b>	<b>Αθροιστικό ποσοστό</b>
0 - 1	14185000	4,11	4,11
1 - 2	34905000	10,12	14,23
2 - 3	41077500	11,90	26,13
3 - 4	44557500	12,91	39,04
4 - 5	43187500	12,52	51,56
5 - 6	40427500	11,72	63,28
6 - 7	35355000	10,25	73,52
7 - 8	29625000	8,59	82,11
8 - 9	22305000	6,46	88,57
9 - 10	14565000	4,22	92,79
10 - 11	9185000	2,66	95,46
11 - 12	6230000	1,81	97,26
12 - 13	3967500	1,15	98,41
13 - 14	2487500	0,72	99,13
14 - 15	1342500	0,39	99,52
15 - 16	1002500	0,29	99,81
16 - 17	462500	0,13	99,94
17 - 18	120000	0,03	99,98
18 - 19	35000	0,01	99,99
19 - 20	30000	0,01	100,00
20 - 21	5000	0,00	100,00

**Πίνακας 6-1 Κατανομή χρόνου επιφάνειας**

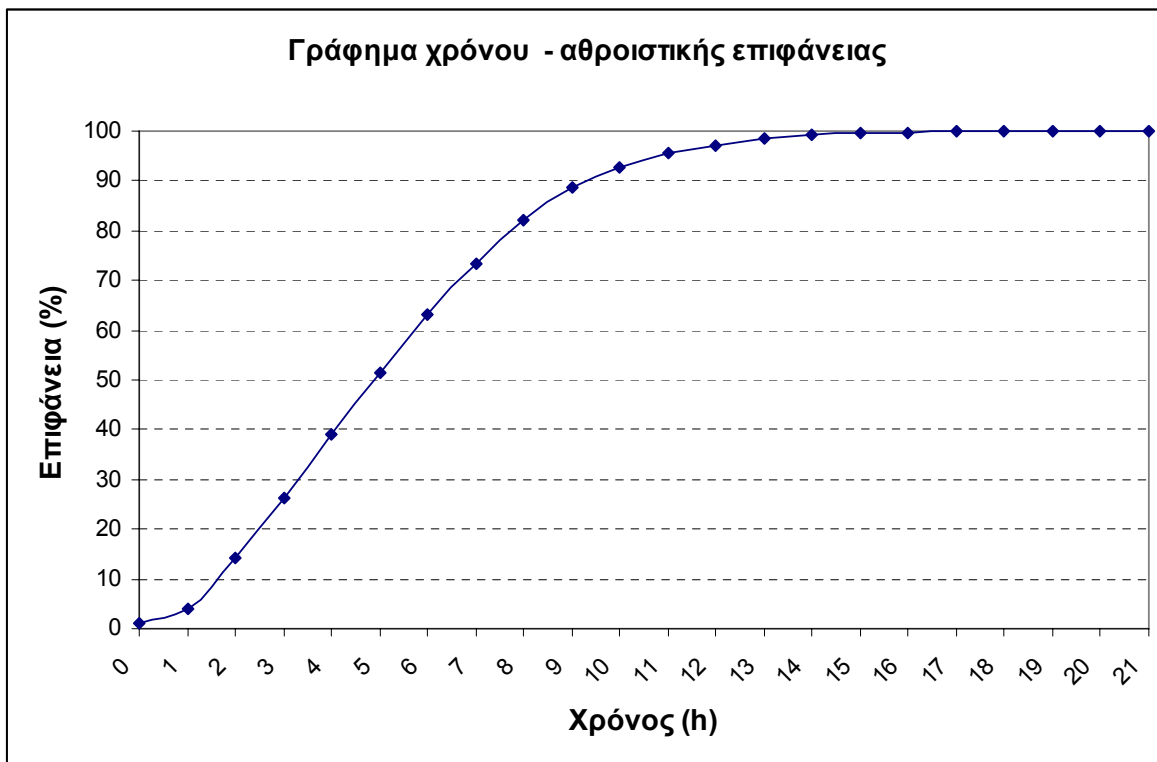




Σχήμα 6-1 Ισόχρονες καμπύλες με βήμα 1 hr



Σχήμα 6-2 Ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας



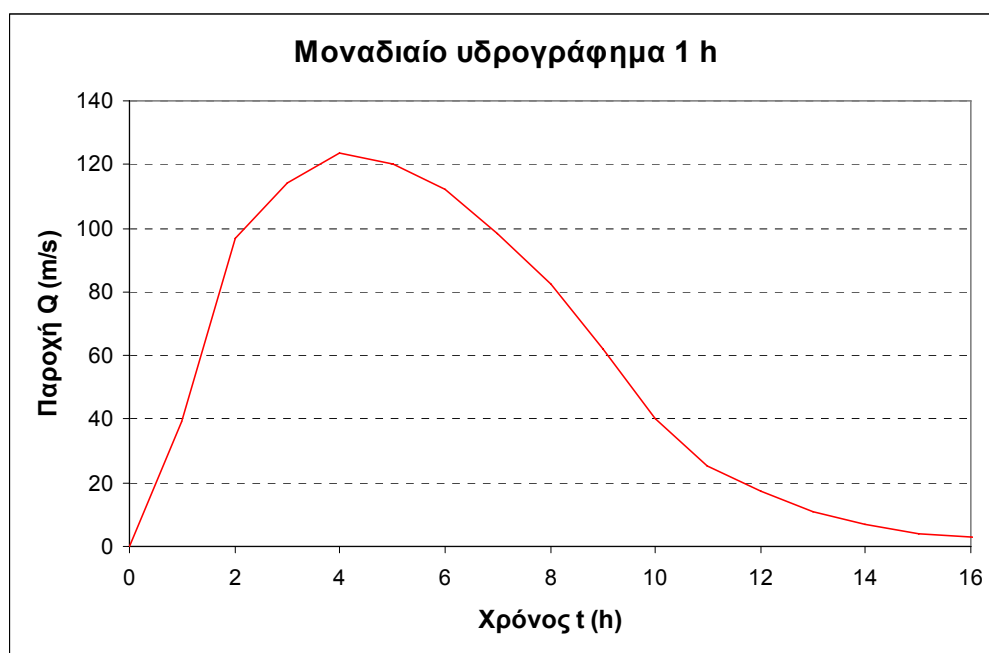
Σχήμα 6-3 Γράφημα χρόνου – αθροιστικής επιφάνειας

Στην περίπτωση στιγμιαίας βροχόπτωσης, ομοιόμορφα κατανεμημένης στην επιφάνεια της λεκάνη, σύμφωνα με την κατανομή εφαρμογή χρόνου επιφάνειας, το 99,5 % της λεκάνη αποφορτίζεται σε 15 hr. Άρα και ο χρόνος συγκέντρωσης είναι πρακτικά 15 hr (Σχήμα 6-3).

Παρατηρείται ότι οι περιοχές που βρίσκονται πιο κοντά σε υδατόρρευμα αποφορτίζονται πιο γρήγορα, γιατί οι έχουν μικρό χρόνο χερσαίας ροής και εισέρχονται γρηγορότερα στο υδατόρρευμα όπου οι ταχύτητες είναι μεγαλύτερες. Οι πιο απομακρυσμένες περιοχές αποφορτίζονται αργότερα, λόγω των μικρών ταχυτήτων της χερσαίας ροής και του μεγάλου συνολικού μήκους ροής που έχουν να διανύσουν.

### 6.3 Υπολογισμός συνθετικών υδρογραφημάτων

Από το ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας υπολογίστηκε το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα διάρκειας 1 hr. Αυτό έγινε πολλαπλασιάζοντας την επιφάνεια με την ένταση της βροχόπτωσης 10 mm/h. Το μοναδιαίο υδρογράφημα που προέκυψε παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-4.



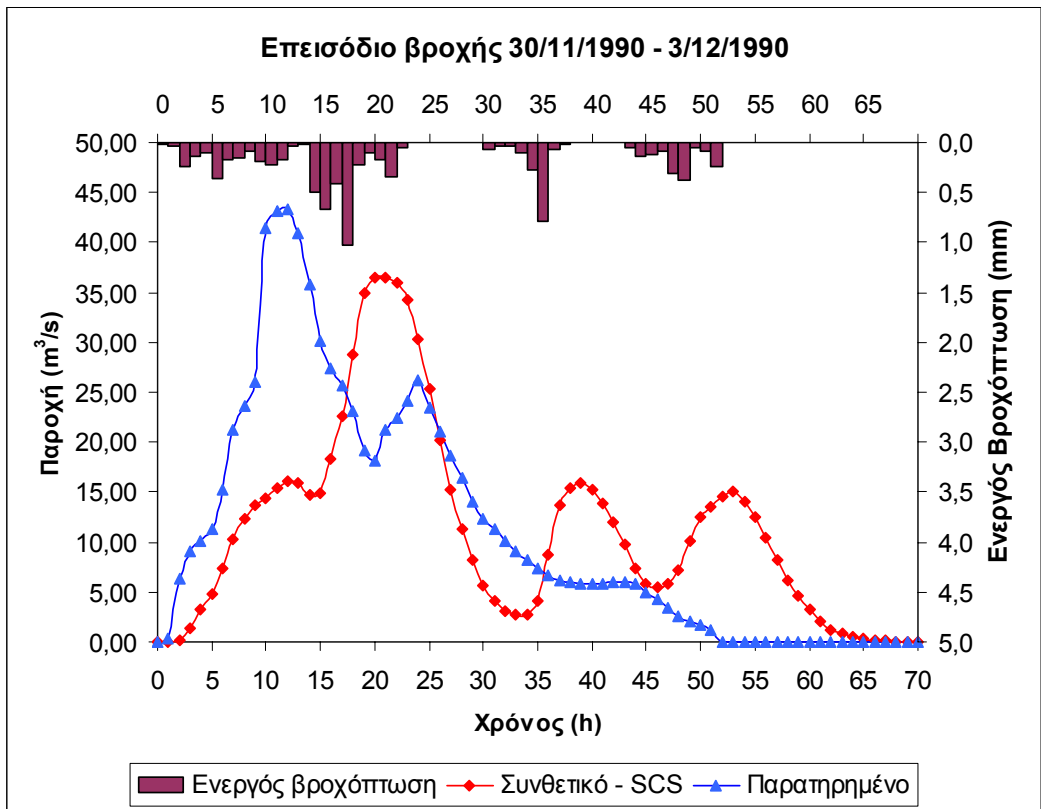
Σχήμα 6-4 Μοναδιαίο υδρογράφημα 1 h

Για την υπολογισμό των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων εφαρμόστηκε η ενεργός ένταση βροχής (όπως προέκυψε από την μέθοδο SCS) στο ιστόγραμμα χρόνου – επιφάνειας. Η ένταση της βροχής είναι διαφορετική για κάθε ώρα. Η διαδικασία αυτή

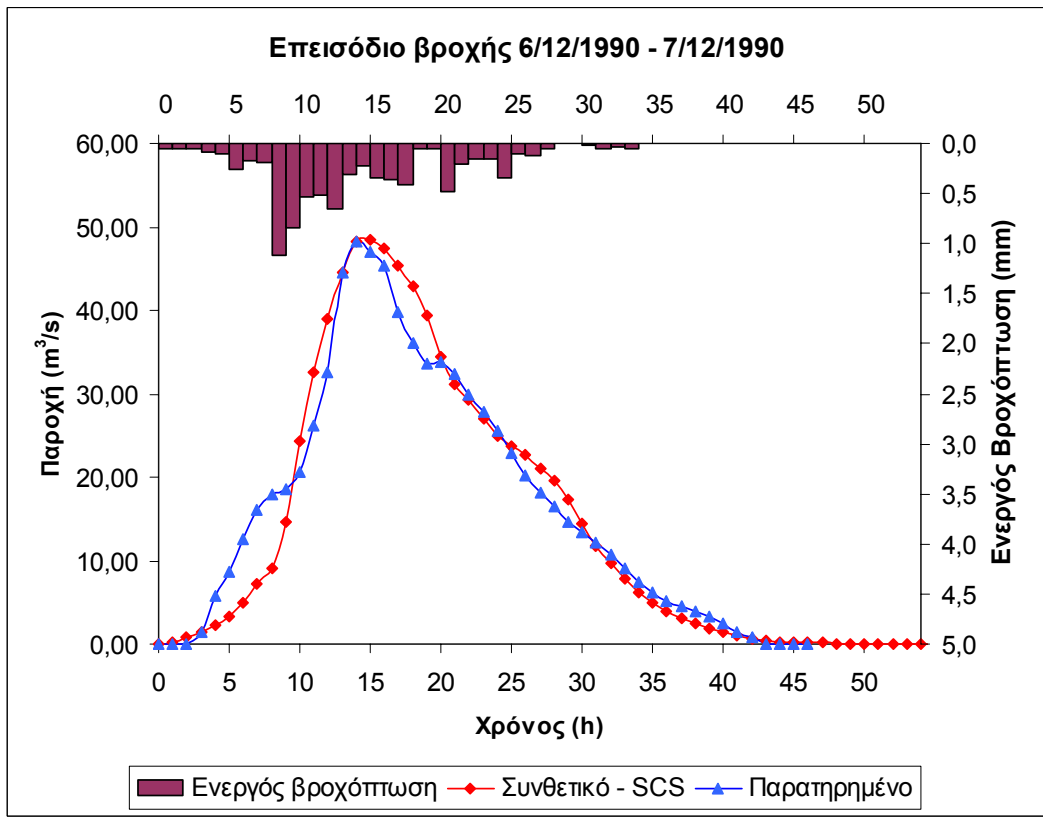
εφαρμόζεται για κάθε ώρα χωριστά, δηλαδή πολλαπλασιάζεται η ενεργός ένταση της κάθε ώρας με τα επιμέρους εμβαδά του ιστογράμματος χρόνου επιφάνειας και προκύπτει για κάθε ώρα ένα πλημμυρογράφημα. Τα πλημμυρογραφήματα αυτά αθροίζονται όντας μετατοπισμένα το κάθε ένα από το προηγούμενό του κατά μία ώρα, σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας (οριζόντια άθροιση των τεταμένων των επιμέρους πλημμυρογραφημάτων).

Για την σύγκριση των παρατηρημένων υδρογραφημάτων με τα συνθετικά αφαιρείται η βασική απορροή από τα παρατηρημένα αφού τα συνθετικά προσομοιώνουν μόνο την άμεση απορροή.

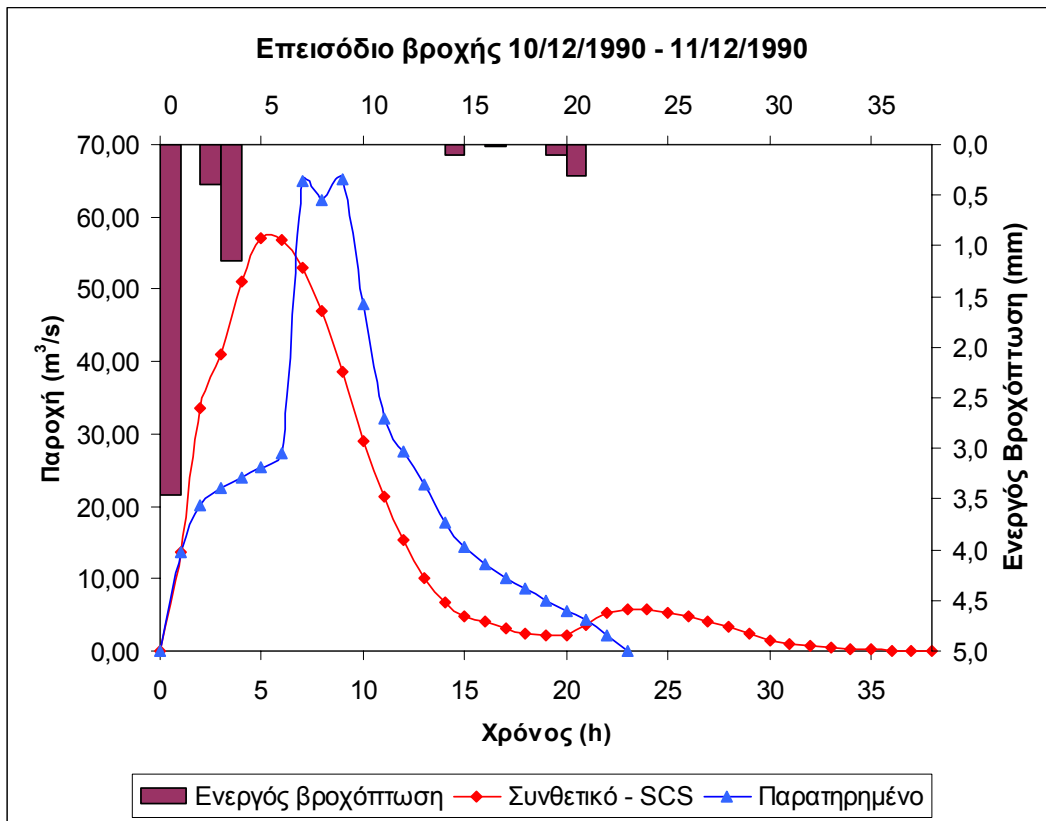
Στα παρακάτω σχήματα ακολουθούν τα 4 επεισόδια βροχής-απορροής που εξετάστηκαν. Στα γραφήματα αυτά διακρίνονται με κόκκινο χρώμα τα συνθετικά υδρογραφήματα, με μπλε χρώμα τα παρατηρημένα και επίσης διακρίνεται το ενεργό υετογράφημα, στο πάνω μέρος κάθε διαγράμματος, όπως προέκυψε από την μέθοδο SCS.



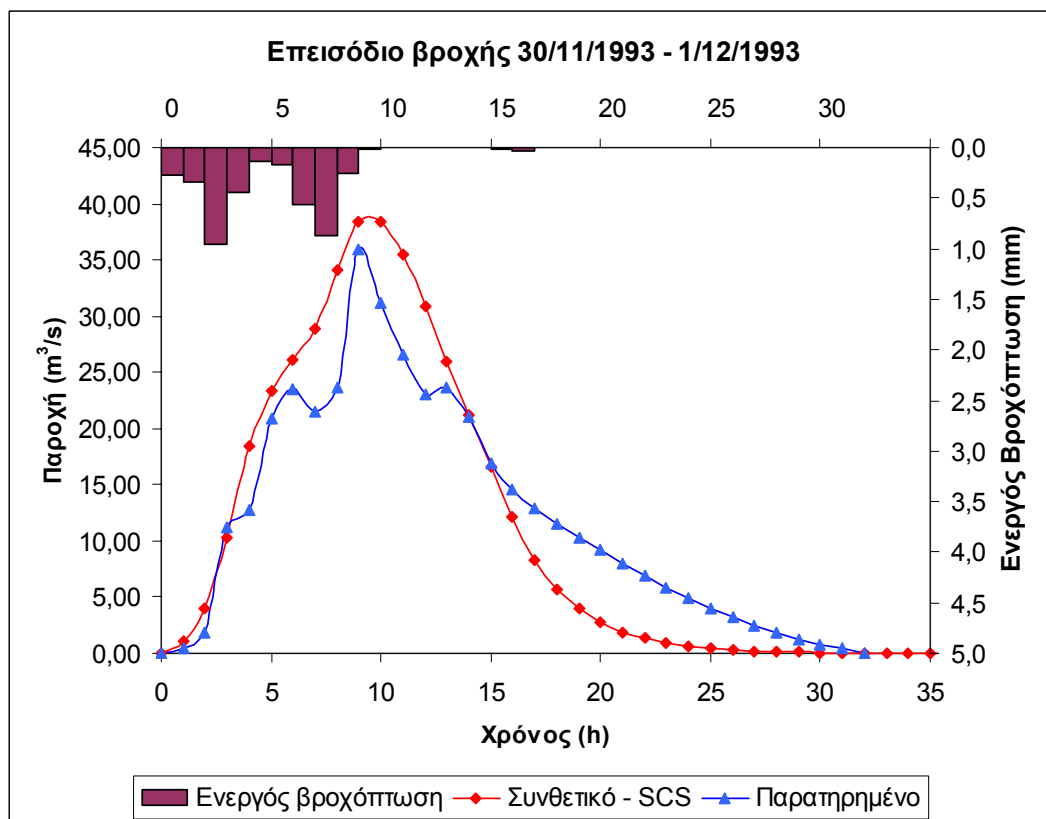
**Σχήμα 6-5 Επεισόδιο βροχής 30/11/1990 – 3/12/1990**



**Σχήμα 6-6 Επεισόδιο βροχής 6/12/1990 – 7/12/1990**



**Σχήμα 6-7 Επεισόδιο βροχής 10/12/1990 – 11/12/1990**



**Σχήμα 6-8 Επεισόδιο βροχής 30/11/1993 – 1/12/1993**

## 6.4 Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την αντιπλημμυρική προστασία η εκτίμηση της πλημμυρικής αιχμής έχει την πρώτη και πολλές φορές και την μοναδική προτεραιότητα. Το δεύτερο μέγεθος το οποίο ενδιαφέρει είναι ο χρόνος αιχμής. Συνεπώς, οι παράμετροι που αναλύθηκαν είναι η παροχή αιχμής και ο χρόνος αιχμής. Η στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι το σχετικό σφάλμα:

$$rel.error = \frac{X_{sim} - X_{obs}}{X_{obs}}$$

Όπου:

Rel.error : Το σχετικό σφάλμα

$X_{sim}$  : Η εκτιμημένη τιμή

$X_{obs}$  : Η παρατηρημένη τιμή

Το σχετικό σφάλμα λαμβάνει τιμές τόσο θετικές όσο και αρνητικές. Λαμβάνει την τιμή 0 όταν η εκτιμημένη τιμή ταυτίζεται από την παρατηρημένη. Μεταξύ 2 εκτιμημένων τιμών καλύτερη θεωρείται η τιμή όπου η απόλυτη τιμή του σχετικού σφάλματος είναι μικρότερη, που πλησιάζει δηλαδή, περισσότερο το 0.

Κατά την διαδικασία της ρύθμισης ο συντελεστή που χρησιμοποιήθηκε είναι η μέση τιμή του σχετικού σφάλματος (ΜΣΦ), αφού χρησιμοποιήθηκαν 2 επεισόδια βροχής – απορροής. Για τον υπολογισμό του λαμβάνονται οι απόλυτες τιμές των σχετικών σφαλμάτων.

$$ΜΣΦ = \frac{\sum_{i=1}^n |rel.error|}{n}$$

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης Nash-Sutcliffe (1970). Ο δείκτης Nash είναι ένα μέτρο σύγκλισης της προσομοιωμένης με την παρατηρημένη χρονοσειρά του υδρογραφήματος και δίνεται από την εξίσωση:

$$NTD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Όπου:

NTD = ο δείκτης Nash-Sutcliffe

Q<sub>obs</sub> = οι παρατηρημένες τιμές της απορροής

Q<sub>sim</sub> = οι προσομοιωμένες τιμές της απορροής

n = το μήκος της χρονοσειράς

Ο δείκτης Nash εξετάζει την ακρίβεια της προσομοίωσης του συνόλου των τιμών των 2 υδρογραφημάτων, και όχι μόνο την τιμή της παροχής αιχμής. Ουσιαστικά εξετάζει αν η μορφή του συνθετικού υδρογραφήματος πλησιάζει την παρατηρημένη. Λαμβάνει ως μέγιστη τιμή την μονάδα, όταν υπάρχει ταύτιση των χρονοσειρών. Δεν έλαβε μέρος στην διαδικασία της ρύθμισης και ο ρόλος του στην ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι λιγότερο σημαντικός από το σχετικό σφάλμα.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6-2) παρουσιάζονται οι τιμές των πλημμυρικών αιχμών και το σχετικό σφάλμα για κάθε επεισόδιο. Επίσης, παρουσιάζεται το μέσο σχετικό σφάλμα (ΜΣΦ) κατά την διαδικασία της ρύθμισης, κατά την διαδικασία της επαλήθευσης καθώς και το συνολικό.

Επεισόδιο βροχόπτωσης	Πλημμυρική αιχμή (m <sup>3</sup> /s)		Σχετικό σφάλμα	ΜΣΦ ρύθμιση	ΜΣΦ επαλή- θευση	ΜΣΦ
	Παρατηρημένη	Προσομοιωμένη				
30/11/1990 - 3/12/1990	43,37	36,51	-0,158	0,081		
6/12/1990 - 7/12/1990	48,32	48,47	0,003			
10/12/1990 - 11/12/1990	65,15	57,11	-0,123		0,089	0,085
30/11/1993 - 1/12/1993	35,88	38,45	0,072			

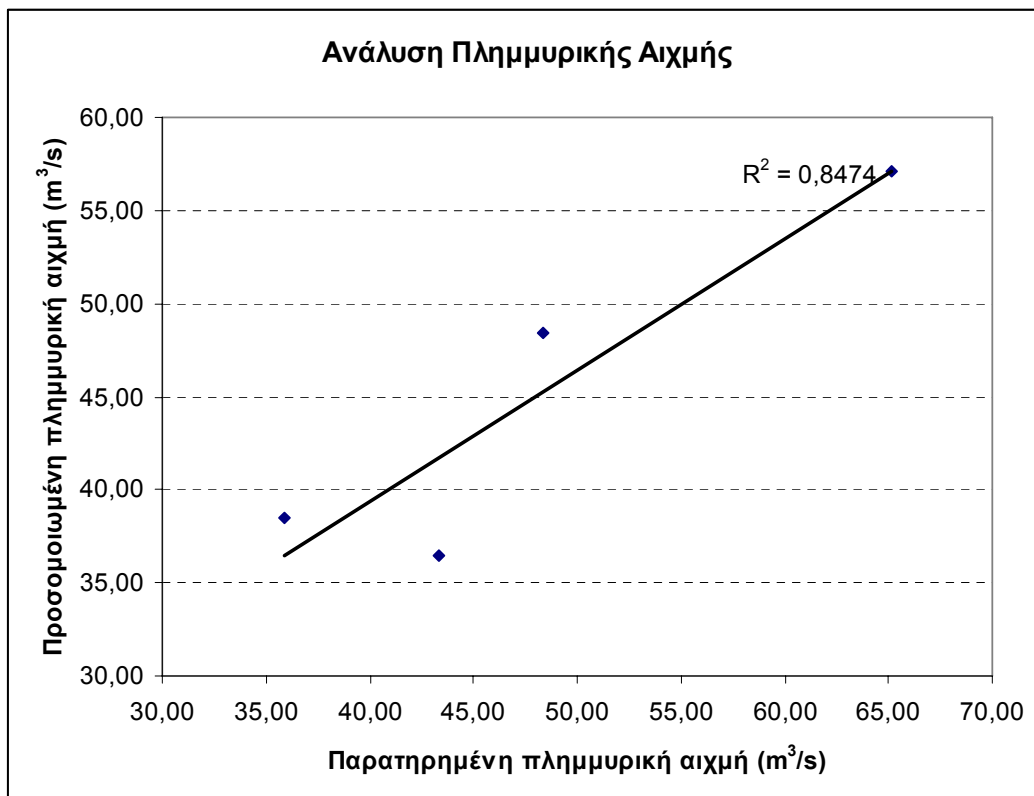
**Πίνακας 6-2 Στατιστική ανάλυση πλημμυρικών αιχμών**

Από τις τιμές του σχετικού σφάλματος παρατηρείται ότι οι μισές υποεκτιμήθηκαν (αρνητικές τιμές σχετικού σφάλματος) και οι άλλες μισές υπερεκτιμήθηκαν (θετικές τιμές σχετικού σφάλματος). Η προσομοίωση θεωρείται επιτυχημένη αφού το σύνολο των απόλυτων τιμών συντελεστών σφάλματος είναι κάτω από 0,2 και το 50% αυτών είναι



μικρότεροι από 0,1. Η τιμή του μέσου συντελεστή σφάλματος της επαλήθευσης ( $MΣΦ_{επαλήθευσης} = 0,089$ ) είναι μικρότερη από 0,1 και είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την τιμή του ίδιου συντελεστή στην ρύθμιση ( $MΣΦ_{ρύθμισης} = 0,081$ ). Συνεπώς, η ρύθμιση θεωρείται επιτυχημένη. Επίσης η τιμή του μέσου συντελεστή σφάλματος για το σύνολο των επεισοδίων έλαβε την τιμή  $0,085 < 0,1$ .

Στο Σχήμα 6-9 παρουσιάζεται το γράφημα εκτιμημένων αιχμών έναντι των παρατηρημένων.



Σχήμα 6-9 Εκτιμημένη έναντι παρατηρημένης πλημμυρική αιχμή (m³/s)

Από το Σχήμα 6-9 παρατηρείται ότι ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  είναι πολύ υψηλός ( $R^2 = 0,8474$ ), με σχετικά μικρή διασπορά τιμών.

Από τους συντελεστές σφάλματος, μέσου σφάλματος και από το γράφημα συμπεραίνεται ότι η μέθοδος χρόνου - επιφάνειας σε συνδυασμό με την μέθοδο SCS, έχει εκτιμήσει με μεγάλη ακρίβεια τις τιμές της πλημμυρικής απορροής.

Στον πίνακα 6-3 παρουσιάζονται οι τιμές του δείκτη Nash για κάθε επεισόδιο βροχής.

Επεισόδιο βροχόπτωσης	Δείκτης Nash
30/11/1990 - 3/12/1990	0,271
6/12/1990 - 7/12/1990	0,955
10/12/1990 - 11/12/1990	0,584
30/11/1993 - 1/12/1993	0,832

**Πίνακας 6-3 Τιμές δείκτη Nash**

Τόσο από τις τιμές του δείκτη Nash όσο και από οπτική σύγκριση παρατηρείται ότι στα 3 από τα 4 επεισόδια η μορφή του συνθετικού υδρογραφήματος προσομοιώθηκε επιτυχώς. Μάλιστα, στο επεισόδιο στις 6/12/1990 – 7/12/1990 υπήρξε σχεδόν ταύτιση (Nash = 0,955). Κατά συνέπεια, στην μορφή του υδρογραφήματος η προσομοίωση μπορεί, επίσης, να θεωρηθεί επιτυχής.

Τέλος, στον πίνακα 6-4 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή σφάλματος για τον χρόνο της αιχμής.

Επεισόδιο βροχόπτωσης	Χρόνος αιχμής (h)		Σχετικό σφάλμα
	Παρατηρημένη	Προσομοιωμένη	
30/11/1990 - 3/12/1990	12	21	0,750
6/12/1990 - 7/12/1990	14	15	0,071
10/12/1990 - 11/12/1990	9	5	-0,444
30/11/1993 - 1/12/1993	9	9	0,000

**Πίνακας 6-4 Στατιστική ανάλυση χρόνων αιχμής**

Παρατηρείται ότι ο χρόνος αιχμής προσομοιώθηκε επιτυχώς μόνο για τα 2 από τα 4 επεισόδια βροχής – απορροής (δηλαδή  $\Sigma\Phi < 0,1$ ). Δεν συνέβη, όμως, το ίδιο και για τα άλλα δύο επεισόδια όπου το σχετικό σφάλμα έλαβε την τιμή 0,75 και -0,44. Παρ' όλα αυτά στο επεισόδιο 6/12/1990 – 7/12/1990 η εκτίμηση του χρόνου αιχμής ήταν απόλυτα ακριβής, με το επεισόδιο αυτό να λαμβάνει μακράν τις καλύτερες τιμές στατιστικών συντελεστών.

## 6.5 Ανάλυση ευαισθησίας

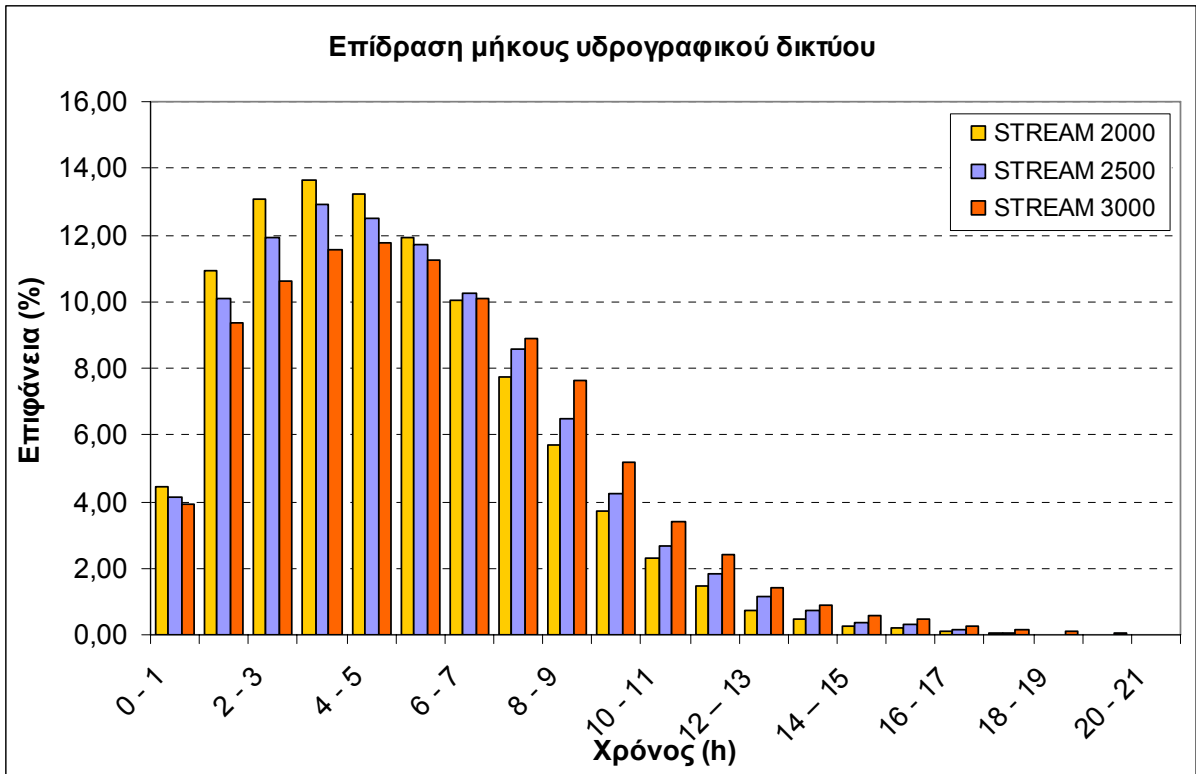
Στην παράγραφο αυτή διερευνείται η επίδραση τη μεταβολής διαφόρων παραμέτρων στο μοναδιαίο υδρογράφημα 1 h που προκύπτει από την μέθοδο χρόνου – επιφάνειας. Κατά την διερεύνηση την μεταβολής κάθε παραμέτρου όλες οι υπόλοιπες διατηρούνται σταθερές. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν είναι:

- Το μήκος του υδρογραφικού δικτύου
- Το ύψος της βροχόπτωσης
- Ο χρόνος συρροής
- Ο συντελεστής  $\alpha$
- Η ένταση της βροχόπτωσης

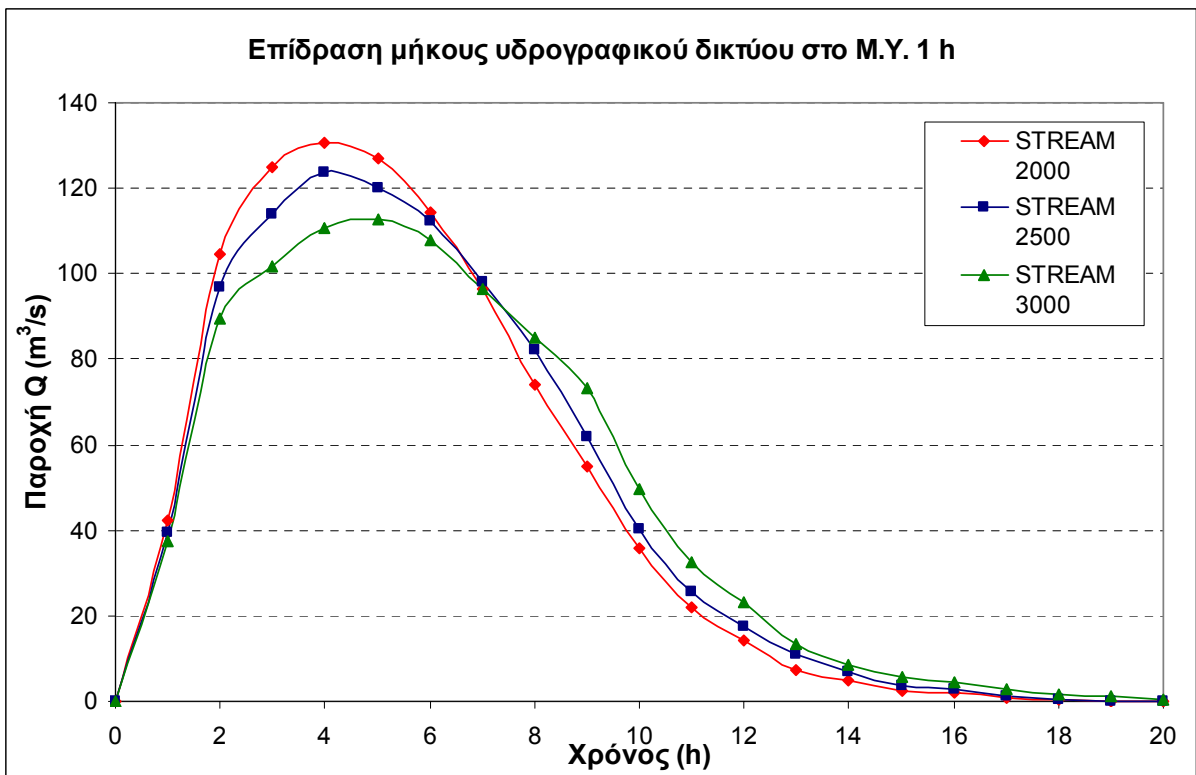
### 6.5.1 Επίδραση μήκους τομής υδρογραφικού δικτύου

Στο μοντέλο καθορίζεται ο σχηματισμός του υδρογραφικού μέσω ενός κατώφλιου, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το κατώφλι αυτό καθορίζει και το μήκος του υδρογραφικού δικτύου, καθώς όσο μικτότερο είναι αυτό το κατώφλι τόσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του υδρογραφικού δικτύου.

Διερευνήθηκε μία τιμή – κατώφλι μεγαλύτερη από 2500 που τελικώς επιλέχθηκε (3000) και μια τιμή μικρότερη (2500). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επίδραση του μήκους του υδρογραφικού δικτύου είναι σημαντική καθώς αύξηση του μήκους ροής οδηγεί σε μεγαλύτερη πλημμυρική αιχμή, ενώ μείωση του μήκους ροής οδηγεί σε μικρότερη πλημμυρική αιχμή και μεγαλύτερο χρόνο αιχμής πλημμύρας.



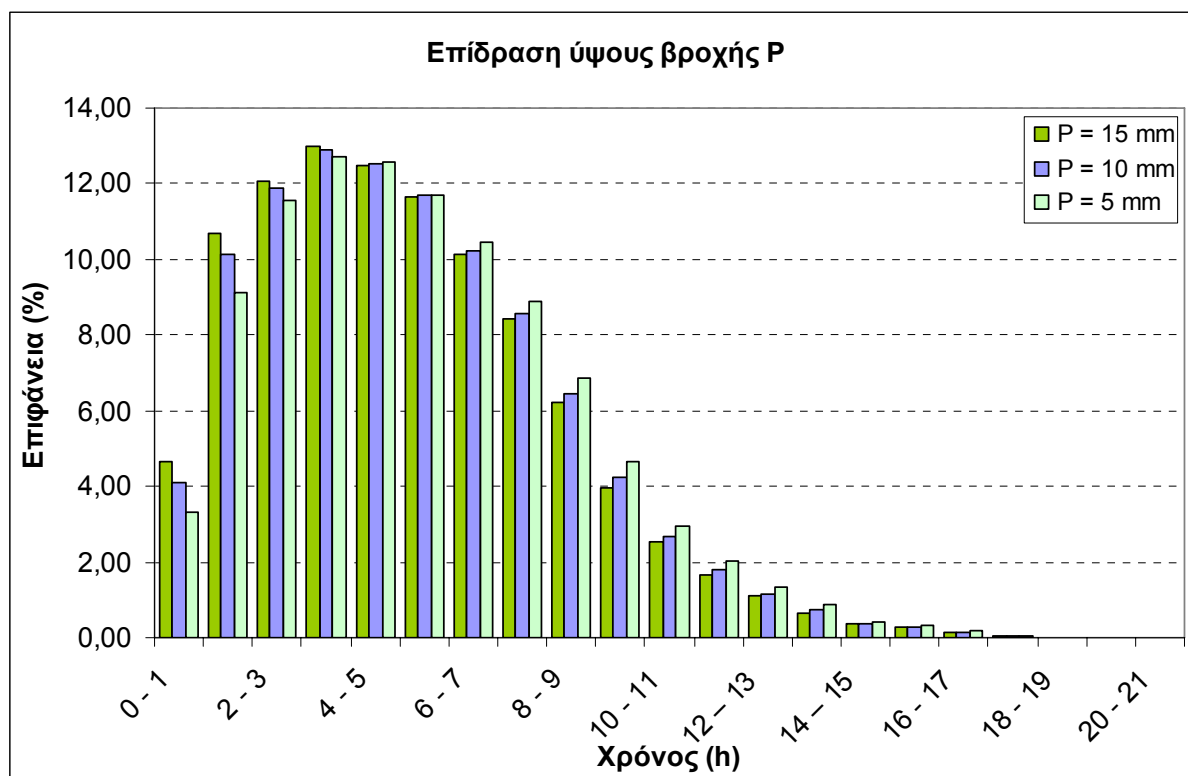
Σχήμα 6-10 Επίδραση μήκους υδρογραφικού δικτύου στο ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας



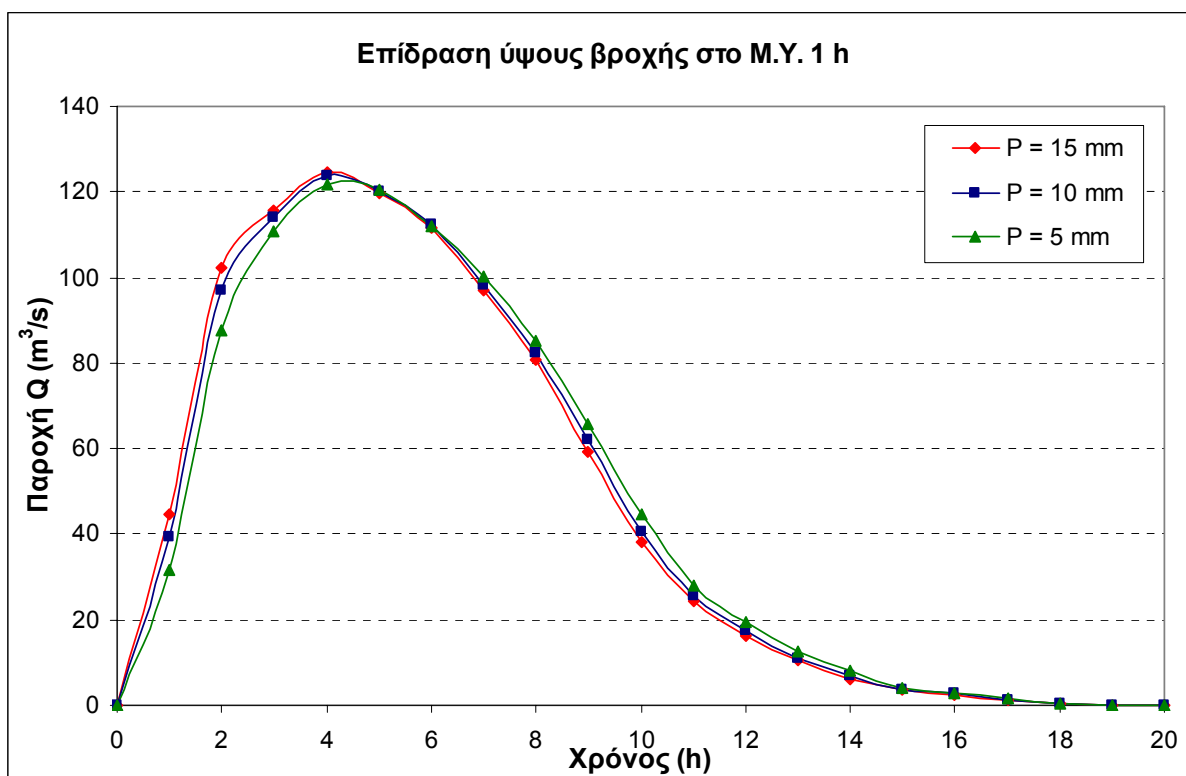
Σχήμα 6-11 Επίδραση μήκους υδρογραφικού δικτύου στο συνθετικό Μ.Υ. 1 h

## 6.5.2 Επίδραση του ύψους βροχής P

Για τον υπολογισμό των μέσων παροχών του υδρογραφικού δικτύου εισάγεται το συνολικό ύψος της βροχόπτωσης του επεισοδίου. Εφόσον η επιδίωξη ήταν ο σχηματισμός του μοναδιαίου υδρογραφήματος επιλέχθηκε η τιμή  $P = 10 \text{ mm}$ . Κατά την ανάλυση την ευαισθησίας δοκιμάστηκαν 2 τιμές, μία μεγαλύτερη ( $P = 15 \text{ mm}$ ) και μία μικρότερη ( $P = 5 \text{ mm}$ ). Η επίδραση που παρατηρείται είναι ανεπαίσθητη στην πλημμυρική αιχμή (αυξάνεται λιγότερο από 1% για  $P = 15 \text{ mm}$  και μειώνεται λιγότερο από 1% για  $P = 5 \text{ mm}$ ) ενώ δεν υπάρχει επίδραση στην στον χρόνο της αιχμής. Συνεπώς, το ύψος της βροχής σχεδόν δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.



Σχήμα 6-12 Επίδραση μήκους υδρογραφικού δικτύου στο ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας

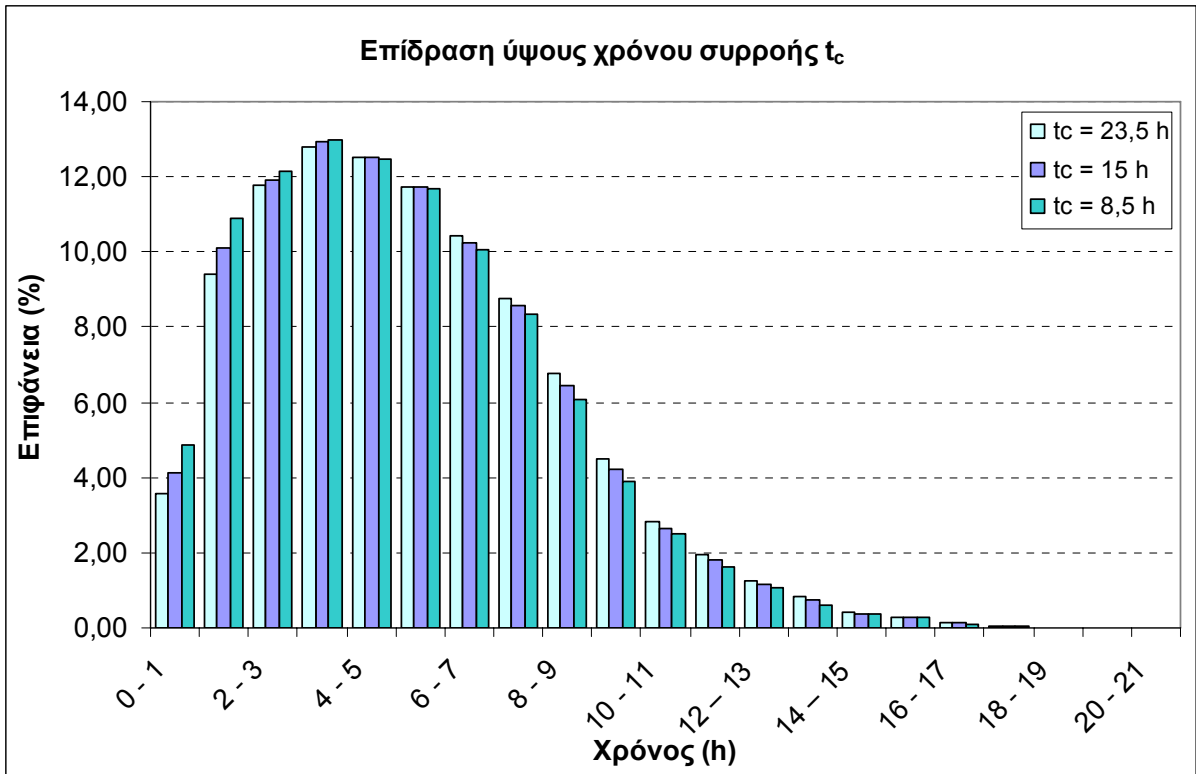


Σχήμα 6-13 Επίδραση μήκους υδρογραφικού δικτύου στο συνθετικό Μ.Υ. 1 h

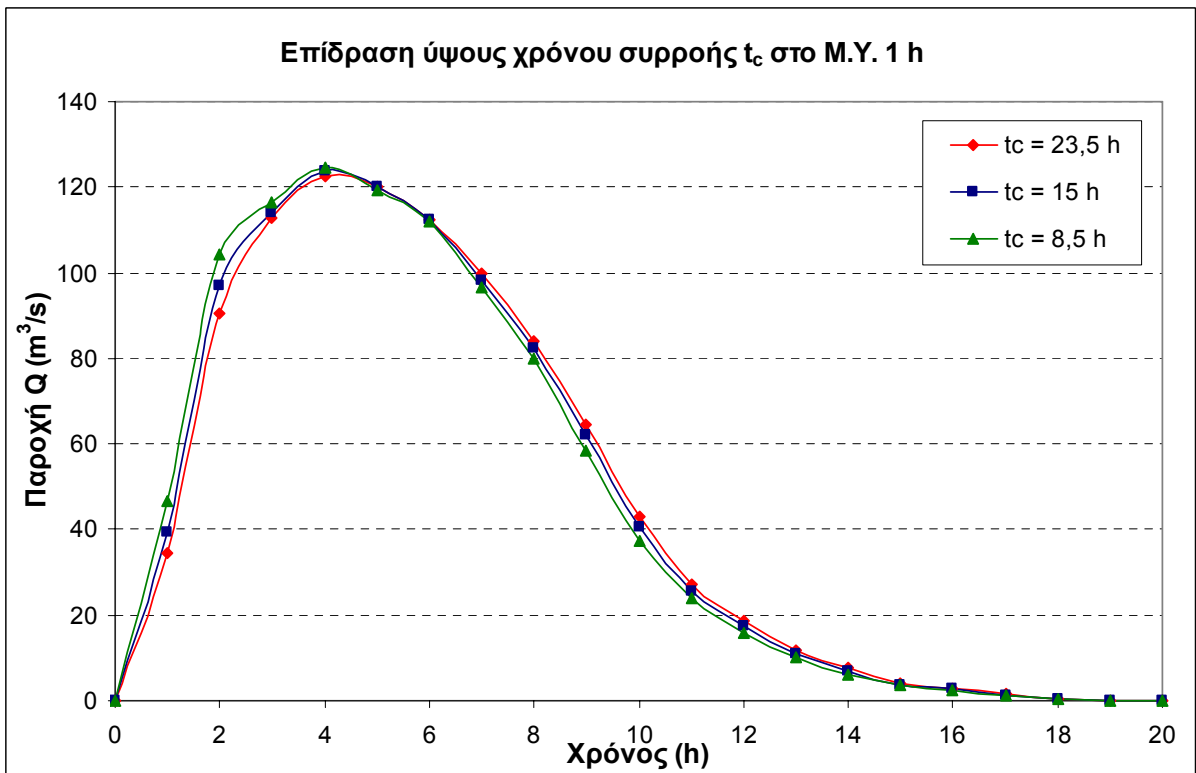
### 6.5.3 Επίδραση χρόνου συρροής $t_c$

Ο χρόνος συρροής που εισάγεται στον μοντέλο αρχικά εκτιμάται από εμπειρικούς τύπους και στην συνέχεια διορθώνεται ανάλογα με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά εξετάστηκε η επίδρασή του στα αποτελέσματα και ιδίως κατά πόσο επηρεάζεται ο χρόνος συρροής του εξαγόμενου συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Εξετάστηκαν δυο περιπτώσεις:  $t_c = 8,5$  h και  $t_c = 23,5$  h. Από τα διαγράμματα που προέκυψαν συμπεραίνεται ότι η μεταβολή του  $t_c$  δεν επηρεάζει ούτε το  $t_c$  του εξαγόμενου Μ.Υ. που παραμένει περίπου στις 15 h, ούτε επηρεάζει το χρόνο αιχμής, ούτε την ίδια την αιχμή.



Σχήμα 6-14 Επίδραση χρόνου συρροής  $t_c$  στο ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας

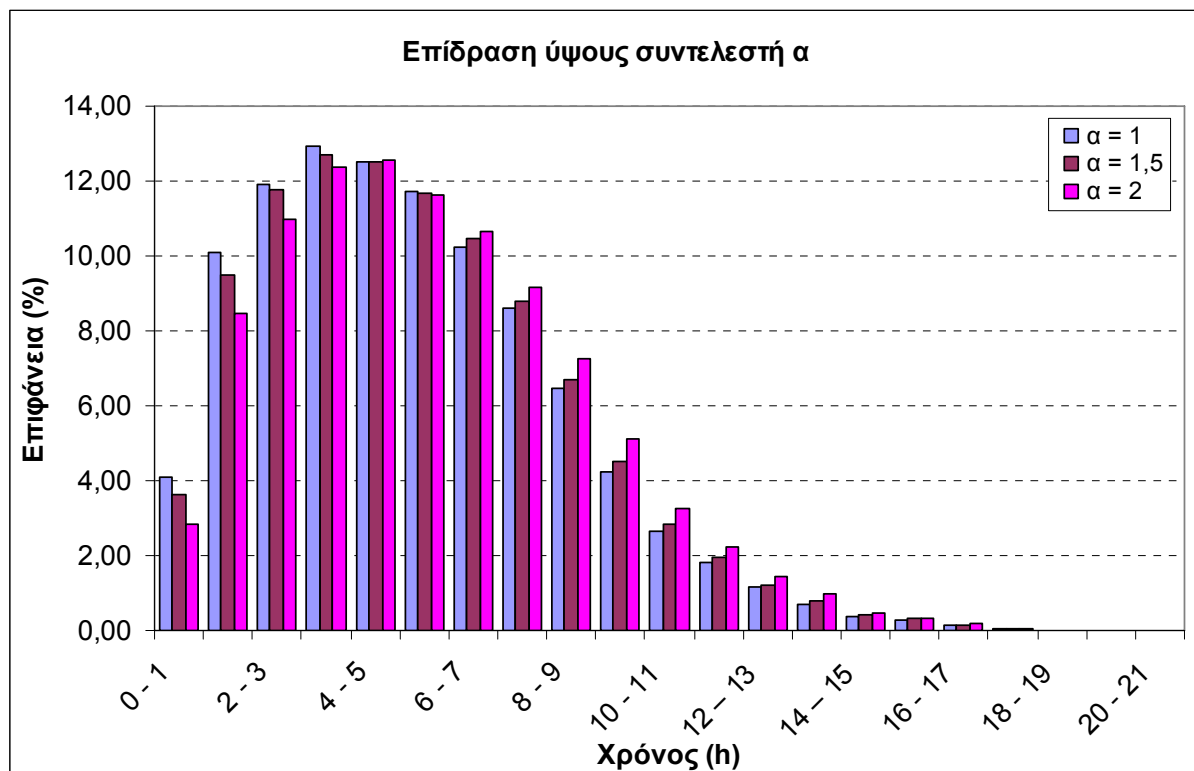


Σχήμα 6-15 Επίδραση χρόνου συρροής  $t_c$  στο συνθετικό Μ.Υ. 1 h

#### 6.5.4 Επίδραση συντελεστή $\alpha$ <sup>1</sup>

Ο συντελεστής  $\alpha$  λαμβάνει και αυτός μέρος στη διαδικασία υπολογισμού των μέσων παροχών του υδρογραφικού δικτύου. Κατά την διαδικασία της ρύθμισης έλαβε την τιμή 1, που σημαίνει ότι ο χρόνος συρροής  $t_c$  κάθε σημείου του υδρογραφικού δικτύου είναι ευθέως ανάλογος της επιφάνειας όπου απορρέει σε αυτό.

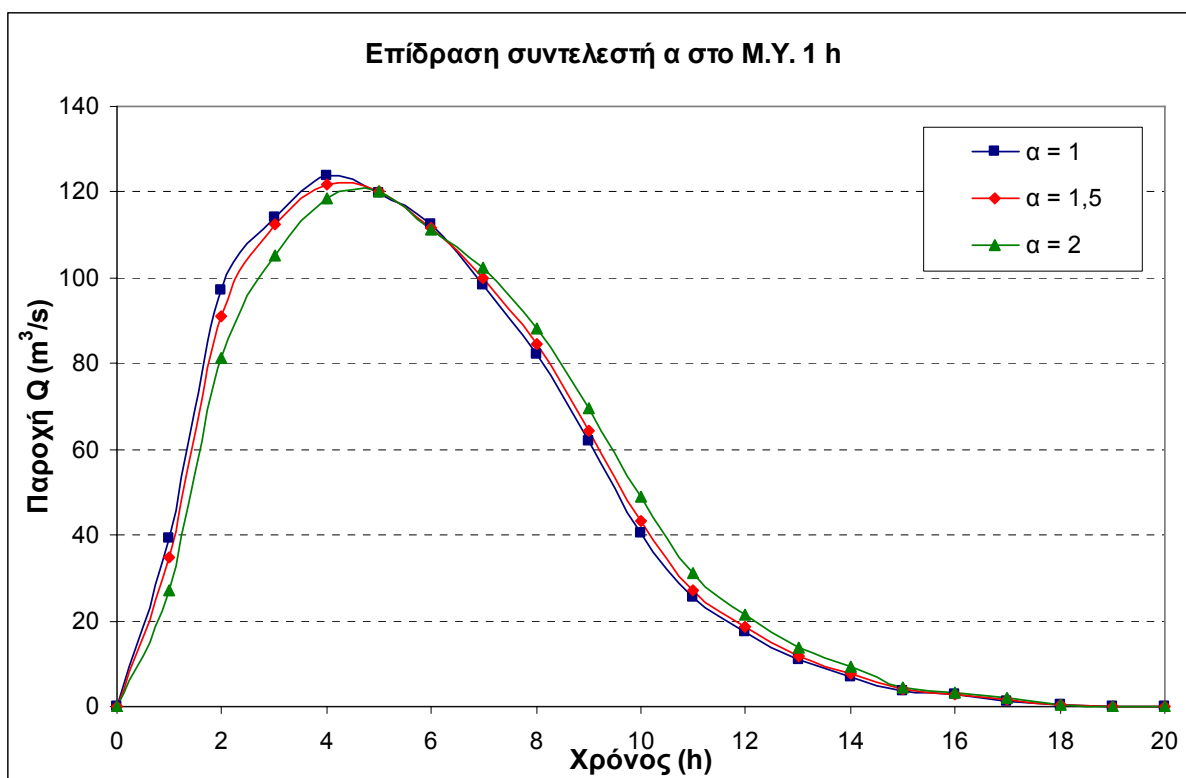
Εξετάστηκε η επίδραση στα αποτελέσματα για την περίπτωση που δεν είναι ίσος με τη μονάδα. Οι τιμές που δοκιμάστηκαν είναι  $\alpha = 1,5$  και  $\alpha = 2$ . Όπως είναι εμφανές από τα διαγράμματα μεγαλύτερες τιμές από τη μονάδα του συντελεστή  $\alpha$  δημιουργούν κάποια μετατόπιση της εμφάνισης της αιχμής, δηλαδή παρουσιάζουν μεγαλύτερο χρόνο αιχμής πλημμύρας. Επίσης παρατηρείται και μικρή μείωση της τιμής της αιχμής. Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικά καθώς με αύξηση του συντελεστή  $\alpha$  υπάρχει επιβράδυνση της ροής του υδρογραφικού δικτύου.



Σχήμα 6-16 Επίδραση του συντελεστή  $\alpha$  στο ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας

<sup>1</sup> Βλέπε παρ. 4.1





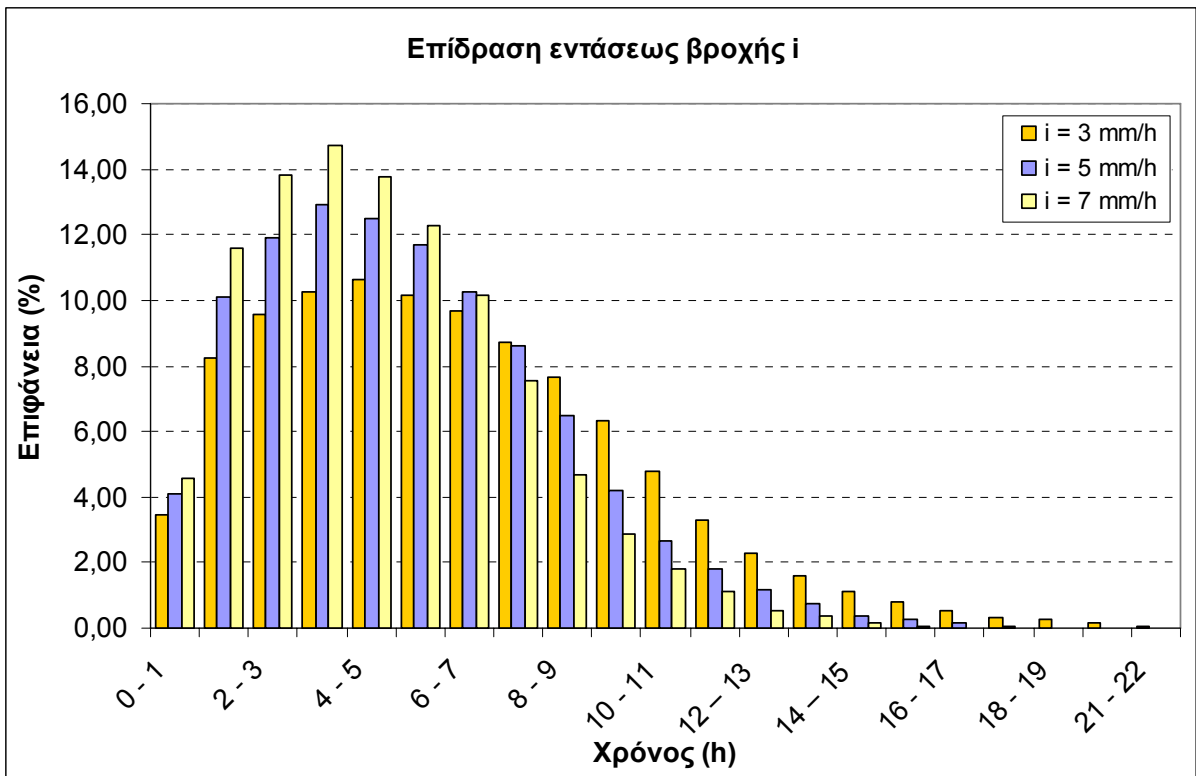
Σχήμα 6-17 Επίδραση του συντελεστή  $\alpha$  στο συνθετικό Μ.Υ. 1 h

### 6.5.5 Επίδραση την ένταση βροχόπτωσης $i$

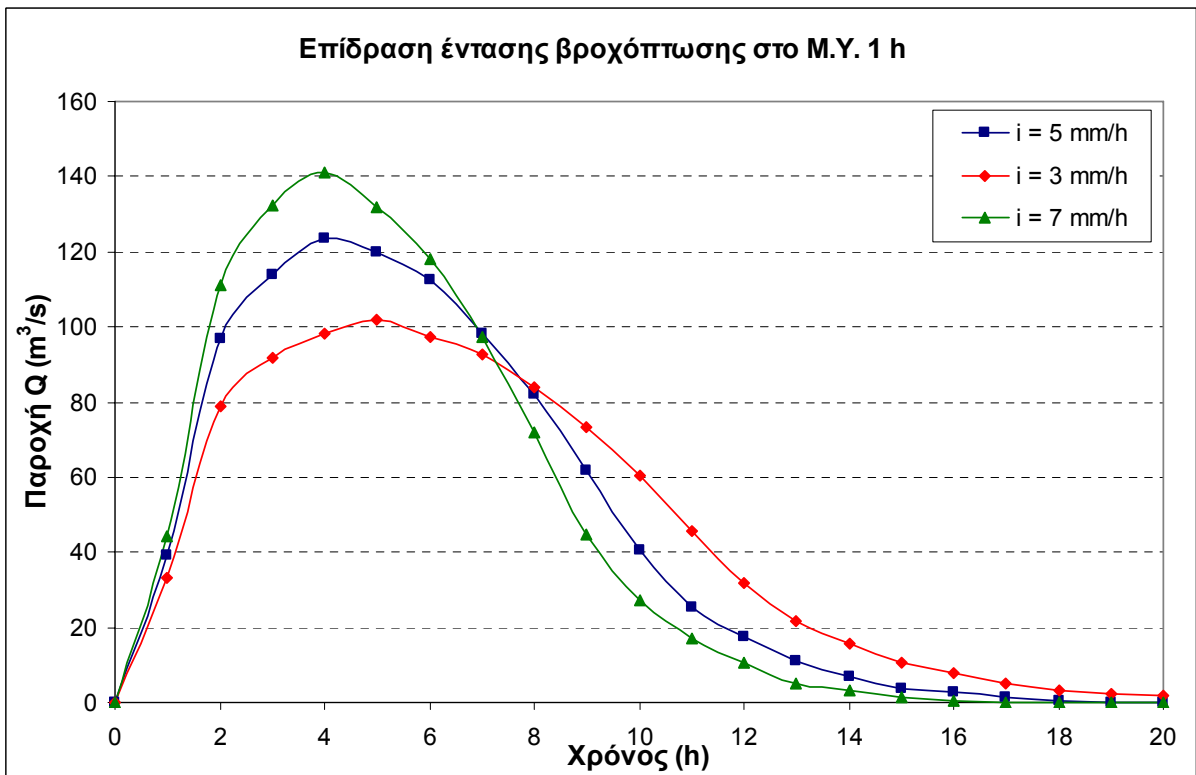
Η τελευταία παράμετρος που εξετάστηκε είναι η ένταση της βροχόπτωσης  $i$ . Είναι η μοναδική παράμετρος που επηρεάζει την ταχύτητα χερσαίας ροής και όχι την ταχύτητα υδρογραφικού δικτύου. Οι τιμές που εξετάστηκαν, πέρα από την τιμή 5 mm που έλαβε κατά την διαδικασία της ρύθμισης είναι  $i = 3 \text{ mm}$  και  $i = 7 \text{ mm}$ .

Τα αποτελέσματα, που φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα, δείχνουν η ένταση της βροχόπτωσης παίζει καθοριστικό ρόλο σε αυτά. Οι μεταβολές που προέκυψαν είναι πολύ μεγάλες. Μεγαλύτερη ένταση βροχής οδηγεί σε μεγαλύτερη παροχή, ενώ μικρότερη οδηγεί σε μικρότερη παροχή και σε μεγαλύτερο χρόνο εμφάνισης της αιχμής.

Συμπερασματικά, καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματα έχουν το μήκος του υδρογραφικού δικτύου (μέσω της τιμής – κατώφλι), και η ένταση της βροχόπτωσης. Για τον λόγο αυτό ήταν και οι σημαντικότερες παράμετροι που διερευνήθηκαν κατά την διαδικασία της ρύθμισης.



Σχήμα 6-18 Επίδραση της έντασης βροχόπτωσης στο ιστόγραμμα χρόνου επιφάνειας



Σχήμα 6-19 Επίδραση της έντασης βροχόπτωσης στο συνθετικό Μ.Υ. 1 h

## 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

### 7.1 Συμπεράσματα - Παρατηρήσεις

Κατά την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αναπτύχθηκε ένα καινούριο μοντέλο βροχής - απορροής μέσα σε περιβάλλον GIS χρησιμοποιώντας την μέθοδο χρόνου επιφάνειας. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποίησε ήδη υπάρχοντα μοντέλα βροχής απορροής όπου υπολόγιζαν χωριστά την χερσαία ροή από την ροή του υδατορρεύματος. Η καινούρια διάσταση που έθεσε είναι ο αυτόματος υπολογισμός των ταχυτήτων υδρογραφικού δικτύου αποκλειστικά μέσα σε περιβάλλον GIS.

Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων οδηγεί σε μια κατ' αρχήν θετική εκτίμηση ως προς την επιτυχία του μοντέλου. Εντούτοις, θα πρέπει να επισημανθούν μερικά πράγματα:

- Τα αποτελέσματα εξαρτώνται άμεσα και σε μεγάλο βαθμό από τα διαθέσιμα βροχομετρικά και υδρομετρικά δεδομένα. Η παραδοχή επιφανειακής βροχόπτωσης ίσης με τις τιμές του βροχομετρικού σταθμού, όταν υπάρχουν δεδομένα μόνο από ένα σταθμό, είναι μονόδρομος αλλά δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Αυτό γίνεται εμφανές σε επεισόδια όπου υπάρχουν δεδομένα από 2 ή περισσότερους σταθμούς μέσα στην υπό μελέτη λεκάνη της Αρετής. Σε αυτά τα επεισόδια παρατηρούνται ύψη βροχής τελείως διαφορετικά από σταθμό σε σταθμό για τις ίδιες ώρες. Επίσης, σε αυτές τις περιπτώσεις η επιφανειακή ολοκλήρωση με την μέθοδο Thiessen δεν είναι η καταλληλότερη. Για καλύτερα αποτελέσματα θα μπορούσε να γίνει ολοκλήρωση με την κάποια γεωστατιστική μέθοδο όπως οι μέθοδοι Kriging ή Cokriging
- Η μέθοδος προσδιορισμού του ενεργού υετογραφήματος είναι η SCS. Επιλέχθηκε αυτή η μέθοδος καθώς παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από άλλες μεθόδους. Παρά ταύτα, το όποιο σφάλμα προκύπτει από την μέθοδο αυτή ή από οποιαδήποτε άλλη μέθοδο μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, μεταφέρεται στα αποτελέσματα αλλοιώνοντας τα.
- Το υδρογραφικό δίκτυο προσομοιώθηκε με κανάλι τραπεζοειδούς διατομής συγκεκριμένων διαστάσεων. Σε περίπτωση που επιλεχθούν άλλες διαστάσεις για το κανάλι αυτό, οι παράμετροι που έχουν προκύψει (παράμετρος  $\alpha$  &  $\beta$ ) αλλάζουν και το μοντέλο πρέπει να διορθωθεί πριν χρησιμοποιηθεί.
- Οι συντελεστές τραχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της χερσαίας ροής προέκυψαν ύστερα από εκτίμηση, έχοντας ως βάση τον χάρτη χρήσεων γης. Η

ορθότητα ή όχι της εκτίμησης των συντελεστών τραχύτητας επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα, αφού η χερσαία ροή παίζει τον σημαντικότερο ρόλο σε αυτά.

- Η ένταση της βροχόπτωσης καθώς και η τιμή – κατώφλι που καθορίζει το μήκος του υδρογραφικού δικτύου είναι οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Οι τιμές που έλαβαν προέκυψαν από την διαδικασία της ρύθμισης. Συνεπώς η χρησιμοποίηση του μοντέλου σε λεκάνη απορροής όπου δεν υπάρχουν μετρημένες απορροές θα ήταν λίγο παρακινδυνευμένη αφού δεν θα μπορούσε να γίνει ρύθμιση. Όσον αφορά τους υπόλοιπους συντελεστές, θα ήταν αποδεκτή η εκτίμησή τους από τον μελετητή, αφού τυχών μεταβολές τους δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα.
- Τέλος, το σφάλμα που μεταφέρεται στα αποτελέσματα από την επεξεργασία της χρονοσειράς της στάθμης και την δημιουργία χρονοσειράς παροχής, μπορεί να θεωρηθεί μικρό αφού δεν αναμένονται καθοριστικές μεταβολές της καμπύλης στάθμης - παροχής μετά από κάθε επεισόδιο βροχής.

## **7.2 Προτάσεις**

Η παρούσα εργασία δεν είναι αρκετή για να εκτιμήσει την επιτυχία ή την αποτυχία του καινούριου μοντέλου, παρά τα κατ' αρχήν θετικά αποτελέσματα. Θα πρέπει να συγκριθεί με άλλες ήδη υπάρχουσες μεθόδους προσδιορισμού των ισόχρονων καμπύλων ή μεθόδους χάραξης μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Επίσης, μπορεί να δοκιμαστεί σε άλλες λεκάνες απορροής με περισσότερα και πιο αξιόπιστα δεδομένα, ιδίως όσον αφορά τα βροχομετρικά δεδομένα. Η λεκάνη αυτή θα μπορούσε να είναι τόσο μεγαλύτερη όσο και μικρότερη, με ανάλογα εξαγόμενα συμπεράσματα.

Ομοίως, το μοντέλο θα μπορούσε να δοκιμαστεί σε λεκάνη όπου οι τιμές της τραχύτητας της χερσαίας ροής έχουν προκύψει με καλύτερη μέθοδο και όχι απαραίτητα βάσει του χάρτη χρήσεων γης.

Επιπροσθέτως, θα μπορούσε το μοντέλο να προσαρμοστεί έτσι ώστε να προσομοιώνεται η ροή υδρογραφικού δικτύου από κανάλι διαφορετικών διαστάσεων από αυτό που επιλέχθηκε.

Τέλος, αν και δεν ενδιαφέρει τόσο την ανάλυση μιας υδρολογικής λεκάνης, θα μπορούσε να εξεταστεί κατά πόσο ο εμπειρικός τύπος που προέκυψε στο κεφάλαιο 4, για τον

υπολογισμό της ομοιόμορφης ροής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές ή κατά πόσο θα μπορούσε να γενικευθεί και για διατομές άλλων διαστάσεων, έτσι ώστε να προσεγγίζεται το ομοιόμορφο βάθος ροής χωρίς τις γνωστές επαναληπτικές διαδικασίες.

## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Βαρσάμου Ε., Κατάρτιση Ισόχρονων καμπυλών με χρήση Γ.Σ.Π. στη λεκάνη απορροής «Αρκουδόρεμα» του ποταμού Νέστου, ΔΠΜΣ «Περιβάλλον & Ανάπτυξη», ΕΜΠ
- Δέρβος Ν., 2005. Υπολογισμός Συνθετικών Υδρογραφημάτων με χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Ευθυμίου Ν., 2007. Ολοκληρωμένη Υδρολογική Μελέτη της Λεκάνης του Ποταμού Καλαμά με χρήση του ομοιώματος S.W.A.T., ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ., 1999. Τεχνική Υδρολογία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ
- Μαμάσης Ν., 2007. Παρουσιάσεις στο μάθημα «Πλημμύρες & Αντιπλημμυρικά έργα» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Μαμάσης Ν., 2007. Παρουσιάσεις στο μάθημα «Προχωρημένη Υδρολογία» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», ΕΜΠ
- Μιμίκου Μ., 1994. Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων, ΕΜΠ
- Μιμίκου Μ. & Μπαλτάς Ε., 2002. Τεχνική Υδρολογία, Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ
- Παπαθανασιάδης Τ., 1995. Φροντιστηριακές Σημειώσεις – Ασκήσεις «Ροή με Ελεύθερη Επιφάνεια», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υ.Π.Υ.Θ.Ε., ΕΜΠ

Σμηρνιώτης Χ., Προκαταρκτική έκθεση υδρογεωλογικής μελέτης καρστικών συστημάτων του Υδατικού Διαμερίσματος της Ηπείρου.

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

Τσούλος Λ., 1999. Ψηφιακή Χαρτογραφία, Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ

Υπουργείο Ανάπτυξης, 2003. Σχέδιο Προγράμματος Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων της Ελλάδας

Υπουργείο Βιομηχανίας, Έρευνας & Τεχνολογίας, 1993. Μελέτη Πιλότος για τη διαχείριση των υδατικών πόρων του Υδατικού διαμερίσματος της Ηπείρου.

.....

Arcement G.J., Jr. and V.R. Schneider, USGS. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains, United States Geological Survey Water – supply Paper 2339, Metric Version

ArcGIS Desktop Help. ESRI ArcGIS Desktop 9.2, Copyright 1999 – 2000

Brater, E. F. and H. W. King. 1976. Handbook of Hydraulics for the Solution of Hydraulic Engineering Problems. New York: McGraw-Hill Book Company.

Engman, E. T. 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. J. Irrig. Drainage Eng. 112(1):39-53.

Kilgore J.L., 1997. Development and evaluation of a GIS-based spatially distributed unit hydrograph model. MS thesis, Biological Systems Engineering Dept., Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg

Li Z. and Zhang J., 2001. Calculation of Field Manning's Roughness Coefficient, Agricultural Water Management 49: 153-161

Ladson A., Lang S., Anderson B., Rutherford I., 2003. The Institution of Engineers, Australia 28th Hydrology and Water Resources Symposium, Wollongong, NSW

Marathon Data Systems, 2002. Training manual ArcGIS, ESRI

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

Wesche T., Hill W. & Hasfurther V., 1983. Two Approaches for Estimation of Manning's n in Mountain Streams, Wyoming Water Research Center University of Wyoming, Laramie, Wyoming

.....

➤ <http://cultureportalweb.uoi.gr/cultureportalweb/>

(Οδηγός Περιφέρειας Ηπείρου)

➤ <http://diocles.civil.duth.gr/>

(Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης - Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών)

➤ <http://geogr.eduportal.gr/>

(Δικτυακός τόπος e – γεωγραφία)

➤ <http://water.me.vccs.edu/>

(Water/ Wastewater Distance Learning)

➤ <http://www.sagiada.gr/>

(Δικτυακός τόπος Δήμου Σαγιάδας)

➤ <http://support.esri.com/>

(ESRI Support Center)



➤ <http://www.panoramio.com/>

(Δικτυακός τόπος με φωτογραφίες βασισμένος στο Google Earth)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### *Τεχνικές Συμβουλές για μελλοντική εκτέλεση του μοντέλου*

Το μοντέλο δημιουργήθηκε εστί ώστε να μπορεί να εκτελεστεί βήμα προς βήμα. Τα μοναδικά πρωτογενή δεδομένα που χρειάζονται για την εκτέλεσή του είναι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, μια μάσκα για το Ψ.Μ.Ε., η οποία μπορεί να δημιουργηθεί από αυτό, και ο κάναβος με τις τραχύτητες Manning n για τον υπολογισμό της χερσαίας ροής.

Αφού εισαχθούν οι παραπάνω κάναβοι σε ένα νέο χάρτη (New empty map) αποθηκεύεται σε μια τοποθεσία όπου θα ορίσει ο χρήστης. Στον φάκελο όπου τοποθετηθεί το αρχείο αυτό (αρχείο .mxd) θα πρέπει να δημιουργηθούν 3 φάκελοι με ονόματα:

- MODELS
- TEMP
- OUTPUT

Στον φάκελο MODELS θα πρέπει να τοποθετηθεί το αρχείο ISOCHRONES.tbx όπου περιέχει το μοντέλο. Ύστερα πρέπει να εισαχθεί στο χάρτη του χρήστη με την εντολή Add Toolbox (δεξί κλικ πάνω στο Arc Toolbox).

Το μοντέλο έχει ρυθμιστεί ώστε να δουλεύει σε οπουδήποτε φάκελο επιλέξει ο χρήστης αρκεί να τηρήσει την παραπάνω διαδικασία. Αν, παρ' όλα αυτά δεν λειτουργήσει τότε το αρχείο .mxd καθώς και οι φάκελοι MODELS, TEMP & OUTPUT πρέπει να τοποθετηθούν στην διαδρομή C:/ISOCHRONES/

Ο χρήστης, για την καλύτερη οργάνωσή του, καλό είναι να δημιουργήσει άλλους 2 φακέλους δίπλα στους παραπάνω με ονόματα:

- DATA
- EXPORT

Στον φάκελο DATA μπορεί να τοποθετήσει όλα τα πρωτογενή δεδομένα του και στον φάκελο EXPORT όλα τα αρχεία .dbf τα οποία θα δημιουργήσει για να μπορεί να ανοίξει τους εξαγόμενους πίνακες από αρχείο EXEL.

Παρακάτω παρατίθεται όλη η διαδικασία που ακολουθεί το μοντέλο σε μη αυτοματοποιημένη μορφή, με επεξήγηση για κάθε βήμα.

Επίσης παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής του κάθε βήματος του μοντέλου ISOHRONES, όπως έχουν εξαχθεί από το GIS.

Δημιουργία υδρογραφικού δικτύου				
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Πλήρωση βυθισμάτων ΨΜΕ	dem_kalamas	Hydrology → Fill	fill_dem	Το εργαλείο "γεμίζει" τα βυθίσματα ώστε να προκύψει ένα υδρολογικά ορθό ΨΜΕ
Δημιουργία κανάβου διεύθυνσης ροής	fill_dem	Hydrology → Flow Direction	flow_dir	Υπολογίζει την κατεύθυνση της ροής κάθε φατνίου
Δημιουργία κανάβου συγκεντρωτικής ροής	flow_dir	Hydrology → Flow Accumulation	flow_accum	Αθροίζει τον αριθμό των φατνίων που απορρέουν σε κάθε φατνίο
Δημιουργία κανάβου Υδρογραφικού δικτύου	flow_accum	Math, Logical → Greater than	streams	Επιλέγεται κατώφλι. Για κατώφλι 2500 : input raster or constant value 2 = 2500
Κατάταξη υδρογραφικού δικτύου	streams flow_dir	Hydrology → Stream Order	stream_order	Γίνεται η κατάταξη του υδρογραφικού δικτύου. Method of stream ordering : Strahler
Δημιουργία κανάβου Υδρογραφικού δικτύου με τιμή 1	stream_order	Reclass → Reclassify	recl_stream	Με το εργαλείο αυτό θέτονται σε όλες τις τιμές του υδρογραφικού δικτύου η τιμή 1

Δημιουργία κανάβου παροχών				
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Δημιουργία μάσκας του ΨΜΕ με τιμές όσο η διάσταση του φατνίου	mask_dem	Math → Times	mask_cell	Πολλαπλασιάζεται το μέγεθος του φατνίου (σε m) με την μάσκα του ΨΜΕ. Αυτό γίνεται γιατί το ArcGIS κάνει πράξεις μόνο σε Raster αρχεία και όχι σε τιμές. Cell size = 50
Κάναβος Εμβαδού κάθε φατνίου	mask_cell	Math → Power	cell_area	Η διάσταση του φατνίου υψώνεται στο τετράγωνο και προκύπτει το εμβαδόν κάθε φατνίου The input raster or constant value 2 = 2
Δημιουργία κανάβου με εμβαδά απορρέουσας επιφάνειας κάθε φατνίου	flow_accum cell_area	Math → Times	area_m2	Πολλαπλασιάζοντας τον κανάβο συγκεντρωτικής ροής με το εμβαδόν του κάθε φατνίου προκύπτει το εμβαδόν απορρέουσας επιφάνειας κάθε φατνίου
Δημιουργία κανάβου με εμβαδά απορρέουσας επιφάνειας φατνίων υδρογραφικού δικτύου	recl_stream area_m2	Math → Times	area_str	Πολλαπλασιάζοντας τον κανάβο των εμβαδών απορρέουσας επιφάνειας κάθε φατνίου με το υδρογραφικό δίκτυο (όπου έχει τιμές 1) προκύπτει ένας κανάβος με εμβαδά απορρέουσας επιφάνεια μόνο για το υδρογραφικό δίκτυο
Δημιουργία κανάβου όγκων απορρέουσας επιφάνειας σε m <sup>2</sup> x mm	area_str	Math → Times	vol	Ο προηγούμενος κανάβος πολλαπλασιάζεται με βροχόπτωση (σε mm) και προκύπτει ο απορρεύσιμος όγκος κάθε φατνίου σε m <sup>2</sup> x mm P = 10 mm

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Διαίρεση το Vol με 3600000	vol	Math → Divide Vol/3600000	vol_3600	Διαιρείται το Vol με 1000 για να γίνει ο όγκος σε m <sup>3</sup> και με 3600 για να γίνει ο όγκος παροχή στην 1 ώρα
Δημιουργία μάσκας του ΨΜΕ με τιμές όσο το άθροισμα των φατνίων της μάσκας	mask_dem	Zonal → Zonal Statistics	count_cell	Input raster or feature zone data = mask_dem Zone field value = value Input Value Raster = mask_kalamas Statistic type = SUM
Δημιουργία κανάβου βαρών των επιφανειών	count_cell flow_accum	Math → Divide flow_accum/count_cell	div_ai_a	Ο κানাβος αυτός προσδιορίζει το λόγο της απορρέουσας επιφάνειας για κάθε φατνίου προς τη συνολική επιφάνεια της λεκάνης Ai/A
Δημιουργία μάσκας του ΨΜΕ με τιμές 1	mask_kalamas	Math → Times	mask_1	Πολλαπλασιάζεται η τιμή 1 με την μάσκα του ΨΜΕ.
Δημιουργία κανάβου 1/α	mask_1 Παράμετρος a	Math → Times	div_1_pa	Διαιρείται το mask_1 με την τιμή α. Η τιμή α προκύπτει από calibration. Ενδεικτικά α = 2.5
Δημιουργία κανάβου βαρών (Ai/A <sub>λεκ</sub> ) <sup>(1/a)</sup>	div_ai_a div_1_pa	Math → Power	pow_2	input raster or constant value 1 = div_ai_a input raster or constant value 2 = div_1_pa
Δημιουργία κανάβου χρόνων συρροής του κάθε φατνίου	pow_2 Χρόνος συρροής tc	Math → Times	tci	Ο χρόνος συρροής της λεκάνης tc τίθεται από τον χρήστη.
Δημιουργία κανάβου παροχών	vol_3600 tci	Math → Divide Vol_3600 / tci	q	Αυτός ο κানাβος περιέχει τις μέσες παροχές στο υδρογραφικό δίκτυο, από το οποίο θα προκύψουν οι ταχύτητες υδρογραφικού δικτύου

Υπολογισμός κανάβου ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Δημιουργία κανάβου κλίσεων (%)	fill_dem	Surface → Slope	slope_100	Παράμετρος Output measurement: PERCENT_RISE
Δημιουργία κανάβου κλίσεων (απόλυτες τιμές)	slope_100	Math → Divide slope_100 / 100	slope	Περιέχει τον κανάβο κλίσεων του κάθε φατνίου σε απόλυτες τιμές
Δημιουργία κανάβου μηδενικών τιμών κλίσεων	slope	Reclass → Reclassify	zero_slope	Θέτονται οι τιμές 0 = 1 και οι υπόλοιπες = 0
Επεξεργασία κανάβου μηδενικών τιμών κλίσεων	zero_slope	Math → Times	new_zslope	Πολλαπλασιάζεται το zero_slope με 0,001
Δημιουργία διορθωμένου κανάβου κλίσεων	slope new_zslope	Math → Plus	slope_new	Σε αυτόν τον νέο κανάβο κλίσεων έχουν αντικατασταθεί οι μηδενικές κλίσεις με την πολύ μικρή κλίση 0,001 ώστε να μπορεί το μοντέλο να υπολογίζει ομοιόμορφη κλίση ακόμα και στις τιμές όπου η κλίση ήταν 0.
	slope_new	Math → Times	slope_106	Πολλαπλασιάζεται η κλίση με 1.000.000 και προκύπτει η κλίση $\times 10^6$
	q	Math → Power	pow_1	The input raster or constant value 2 = 2,1481
Υπολογισμός κανάβου παραμέτρου $\alpha \times 10^6$	pow_1	Math → Times	p_a_106	Πολλαπλασιάζεται ο κανάβος pow_1 με 200 δηλαδή με $0,0002 \times 10^6$ και προκύπτει η παράμετρος $\alpha \times 10^6$
Υπολογισμός κανάβου (J/a)	slope_106 p_a_106	Math → Divide slope_106 / p_a_106	div_2	Με την διαίρεση αυτή τα $10^6$ απαλείφονται και προκύπτει η σχέση (J/a)

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Υπολογισμός κανάβου β	q	Math → Power	pow_2	The input raster or constant value 2 = 0,065
	pow_2	Math → Times	param_b	Πολλαπλασιάζεται ο κανάβος pow_2 με 3,3727 και προκύπτει η παράμετρος β
Υπολογισμός κανάβου (-1/β)	param_b	Math → Divide - 1 / param_b	div_3	Με την διαίρεση προκύπτει η σχέση (-1/β)
Υπολογισμός κανάβου υδραυλικού βάθους ροής y <sub>0</sub>	div_2 div_3	Math → Power	y0	The input raster or constant value 1 = div_2 The input raster or constant value 2 = div_3 Προκύπτει το $y_0 = (J/\alpha)^{-1/\beta}$
Υπολογισμός κανάβου ταχύτητας υδρογραφικού δικτύου V <sub>str</sub>	y0	Math → Times	times_5	Πολλαπλασιάζεται ο κανάβος y <sub>0</sub> με την πλευρική κλίση της τραπεζοειδούς διατομής Z = 1,75
	times_5	Math → Plus	plus_1	Προστίθεται το πλάτος του πυθμένα της διατομής b = 2 m
	y0 plus_1	Math → Times	e	Υπολογίζεται η επιφάνεια E της διατομής του νερού
	e q	Math → Divide q / e	vstr	Ο κανάβος V <sub>str</sub> είναι ο τελικός κανάβος ταχυτήτων ροής υδρογραφικού δικτύου

Υπολογισμός κανάβου ταχυτήτων χερσαίας ροής				
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Δημιουργία κανάβου μηκών ροής	flow_dir	Hydrology → Flow Length	x	Επιλέγεται η διεύθυνση υπολογισμού του μήκους ροής UPSTREAM
Δημιουργία κανάβου μηκών φατνίων υδροκρίτη	x	Reclass → Reclassify	minx	Οι μηδενικές τιμές τίθενται με την τιμή 30 (όπου 30m είναι το μήκος χερσαίας ροή που επιλέχθηκε για τα φατνία του υδροκρίτη) και οι υπόλοιπες 0
Δημιουργία κανάβου τελικών μηκών χερσαίας ροής	x minx	Math → Plus	x_new	Αντικαθίστανται οι μηδενικές τιμές (υδροκρίτης) με την τιμή 30
Δημιουργία κανάβου ταχυτήτων χερσαίας ροής Vland	i x_new	Math → Times	ix	Πολλαπλασιάζεται ο κανάβος μηκών ροής με την ένταση την βροχόπτωσης. Η ένταση επιλέγεται από τον χρήστη (σε mm) και προκύπτει από την διαδικασία ρύθμισης
	ix	Math → Divide ix / 3,6	div_ix	Διαιρείται ο κανάβος ix με 3,6 δηλαδή με $3600 \times 10^{-3}$
	div_ix	Math → Power	pow_div_ix	Υψώνεται το div_ix εις το 0,4 The input raster or constant value 2 = 0,4
	slope_new	Math → Times	times_slope	Πολλαπλασιάζεται η κλίση με 100
	times_slope	Math → Power	pow_slope_new	Υψώνεται το times_slope εις το 0,3 The input raster or constant value 2 = 0,3
	pow_div_ix pow_slope_new	Math → Times	times_2	
	n	Math → Power	pow_n	Το n είναι ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους. Εισάγεται ο κανάβος τραχυτήτων n ανάλογα την χρήση γης. Υψώνεται το n εις το 0,6 The input raster or constant value 2 = 0,n

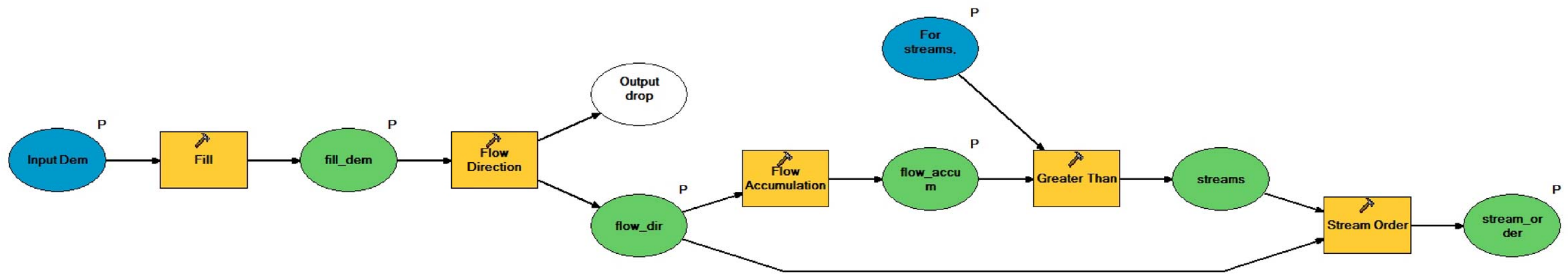


<b>ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b>	<b>ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ</b>	<b>ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS</b>	<b>ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ</b>	<b>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ</b>
Δημιουργία κανάβου ταχυτήτων χερσαίας ροής Vland (συνέχεια)	pow_n times_2 times_3	Math → Times Math → Divide times_2/times_3	times_3  vland	Πολλαπλασιάζεται το pow_n με 1000  Προκύπτει ο κανάβος ταχυτήτων χερσαίας ροής

Δημιουργία τελικού κανάβου ταχυτήτων ροής				
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Εύρεση των No Data φατνίων	vstr	Math → Logical → Is Null	null_vstr	Η εντολή αυτή αντικαθιστά τα No Data φατνία με την τιμή 1 και όλα τα υπόλοιπα με την τιμή 0
Αντικατάσταση των No Data του vstr με 0	null_vstr	Conditional → Con	wide_vstr	Με αυτή την εντολή αντικαθίστανται τα φατνία No Data του vstr με την τιμή 0. Αυτό γίνεται για να μπορεί να γίνει πρόσθεση του vstr με το vland. Input conditional raster : null_vstr Input true raster or constant: 0 Input false raster or constant: vstr Output raster = wide_vstr Expression = 'Value = 1'
Μηδενισμός ταχυτήτων χερσαίας ροής των φατνίων εντός υδρογραφικού δικτύου	vland null_vstr	Math → Times	vland_no_str	Με αυτή την εντολή αντικαθίστανται τα φατνία του vland που είναι εντός υδρογραφικού δικτύου με 0
Τελικός κανάβος ταχυτήτων ροής	wide_vstr vland_no_str	Math → Plus	vtotal	Δημιουργείται ο τελικό κανάβος ταχυτήτων ροής. Μαζί με τις παραπάνω εντολές αυτό που έγινε είναι η αντικατάσταση των φατνίων του vland που είναι εντός υδρογραφικού δικτύου με τον κανάβο ταχυτήτων ροής υδρογραφικού δικτύου.

Δημιουργία ιστογράμματος χρόνου - επιφάνειας				
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΑΡΧΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ARCGIS	ΠΑΡΑΓΩΓΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
Κάναβος 1/Vtotal	vtotal	Math → Divide 1/vtotal	weight	Δημιουργία κανάβου βαρών (1/Vtotal)
Κάναβος 1/Vtotal x10 <sup>3</sup>	weight	Math → Times	weight_1000	Πολλαπλασιάζεται το weight με 1000 γιατί ο κάναβος βαρών πρέπει να αποτελείται από ακέραιους αριθμούς
Ακέραιος κάναβος 1/Vtotal x10 <sup>3</sup>	weight_1000	Math → Int	int_wght1000	Απαλείφονται τα δεκαδικά ψηφία για να γίνει ο κάναβος με ακέραιες τιμές
Κάναβος συγκεντρωτικών χρόνων ροής (1000*sec)	flow_dir int_wght1000	Hydrology → Flow Length	accum_time_s	Επιλέγεται η διεύθυνση υπολογισμού του μήκους ροής DOWNSTREAM
Κάναβος συγκεντρωτικών χρόνων ροής (hr)	accum_time_s	Math → Divide accum_time_s/ 3.600.000	accum_time_hr	Διαίρεση του accum_time_s με 3600*1000
Δημιουργία κανάβου ιστογράμματος χρόνου επιφάνειας με βήμα 1 hr	accum_time_hr	Reclass → Reclassify	histogram	Για χρονικό βήμα 1 hr το Reclassification είναι: 0 - 1 → 1 1 - 2 → 2 2 - 3 → 3 3 - 4 → 4 κ.ο.κ.

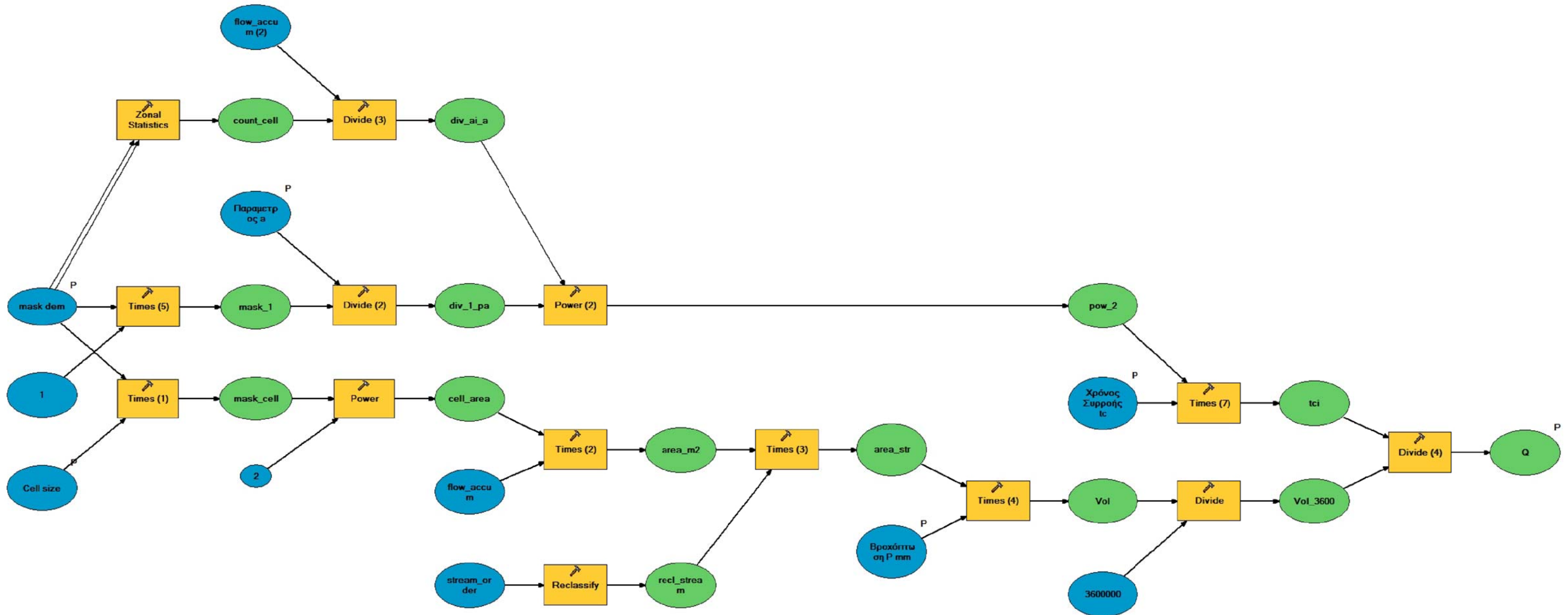
Δημιουργία και ιεράρχιση υδρογραφικού δικτύου - (1) stream



**Μοντέλο (1) stream**

Δημιουργία και ιεράρχιση υδρογραφικού δικτύου

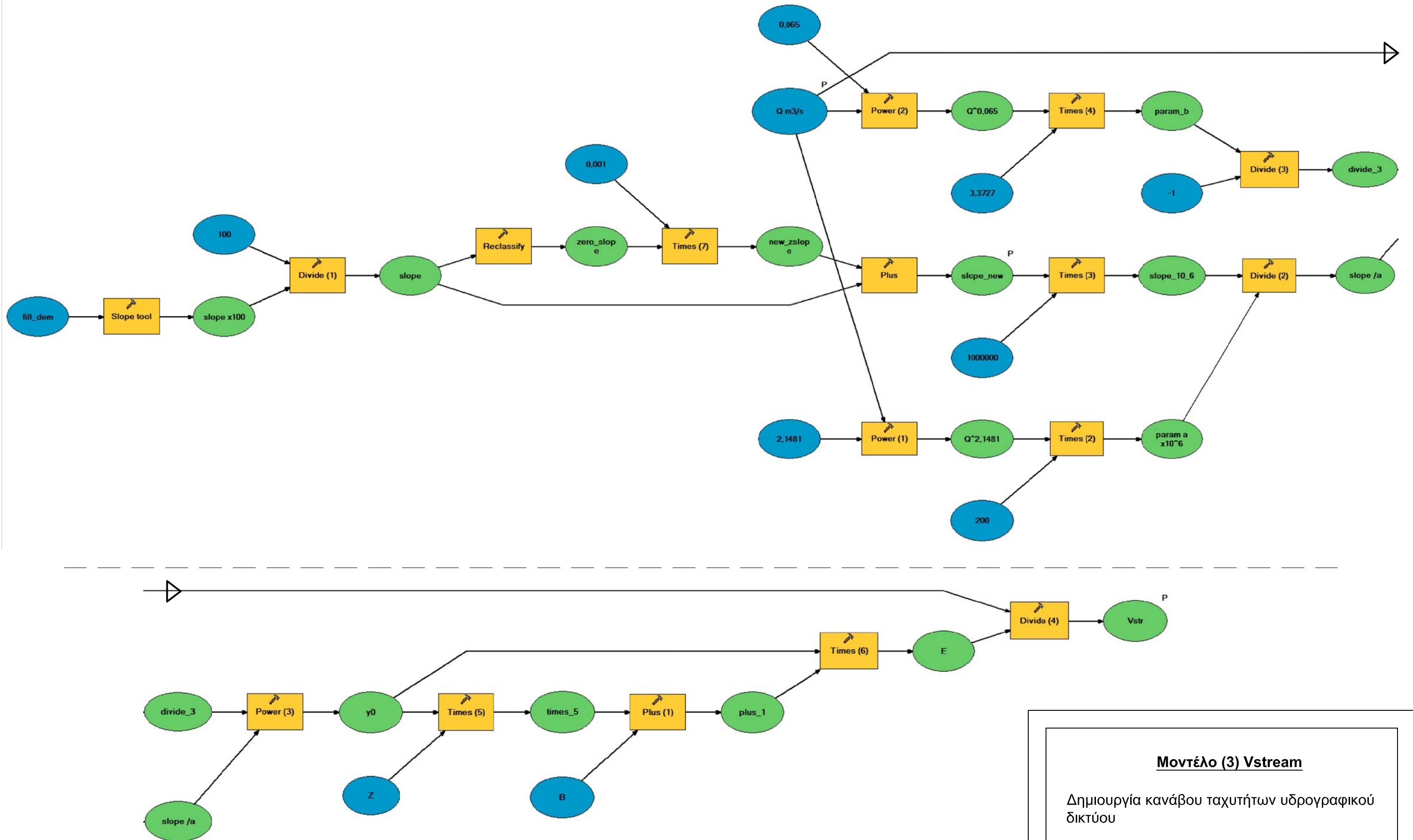
## Δημιουργία κανάβου παροχών υδρογραφικού δικτύου - (2) Qstream



### Μοντέλο (2) Qstream

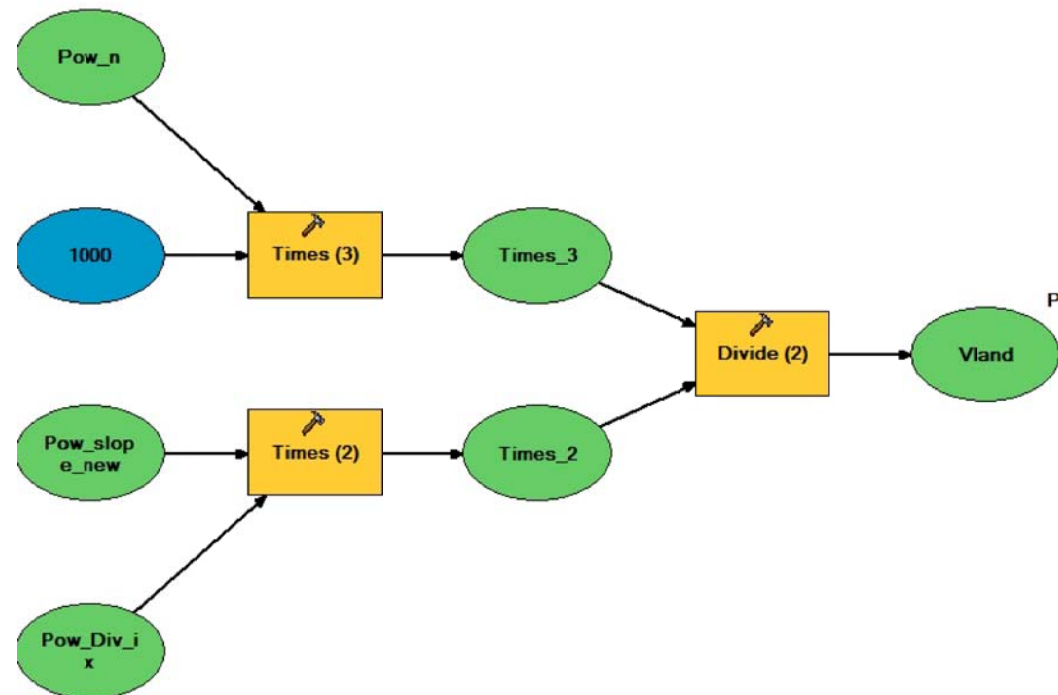
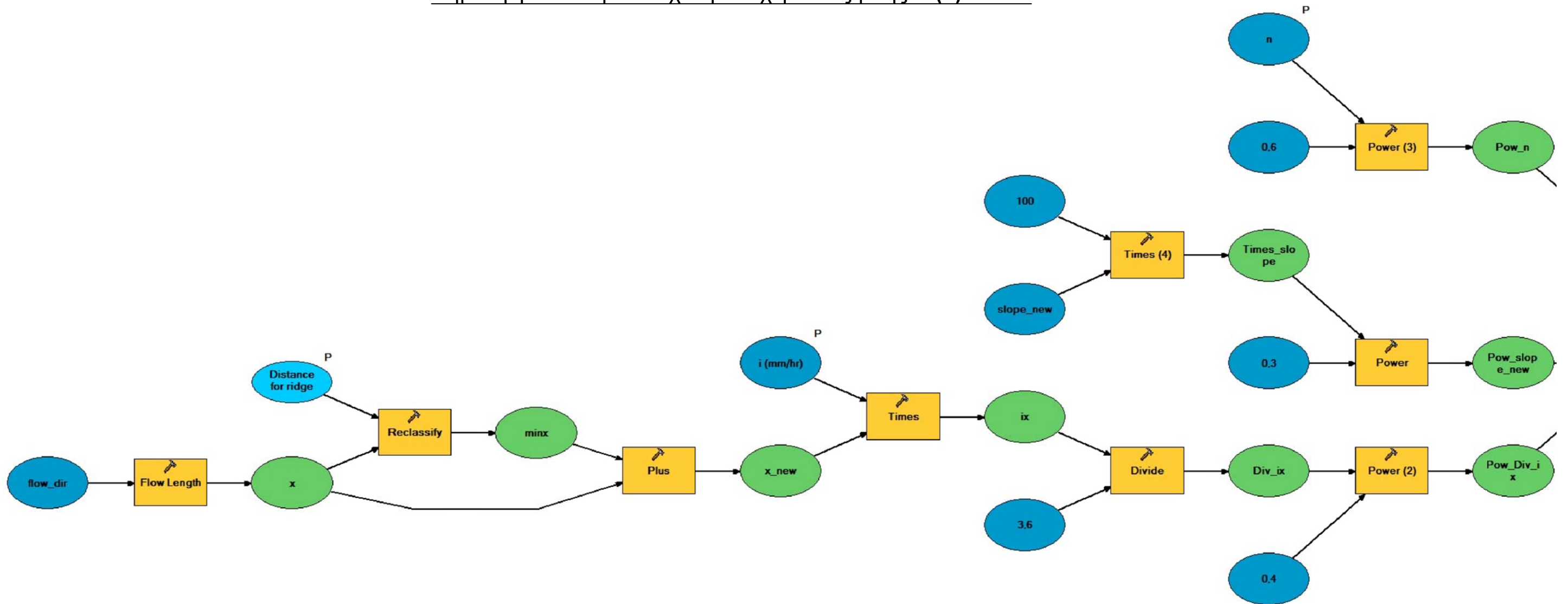
Δημιουργία κανάβου παροχών υδρογραφικού δικτύου

### Δημιουργία κανάβου ταχυτήτων υδρογραφικού δικτύου - (3) Vstream



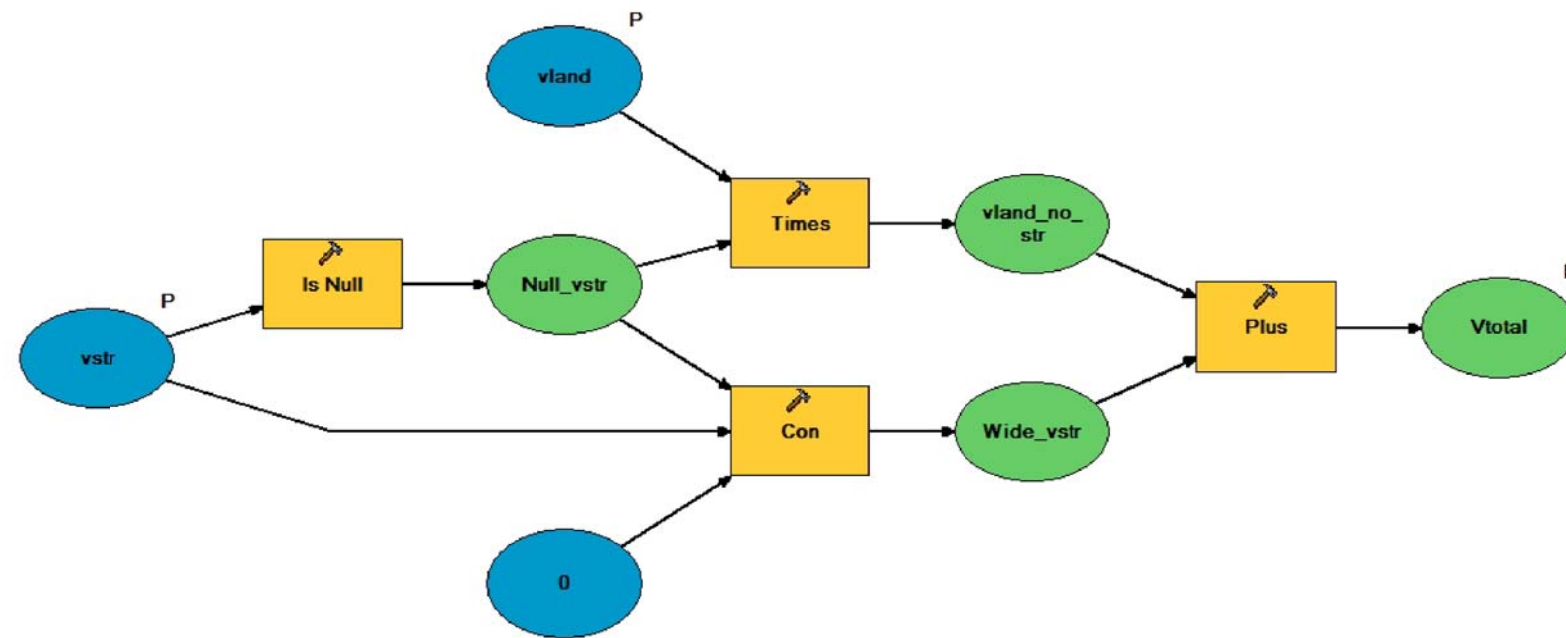
**Μοντέλο (3) Vstream**  
 Δημιουργία κανάβου ταχυτήτων υδρογραφικού δικτύου

Δημιουργία κανάβου ταχυτήτων χερσαίας ροής - (4) Vland

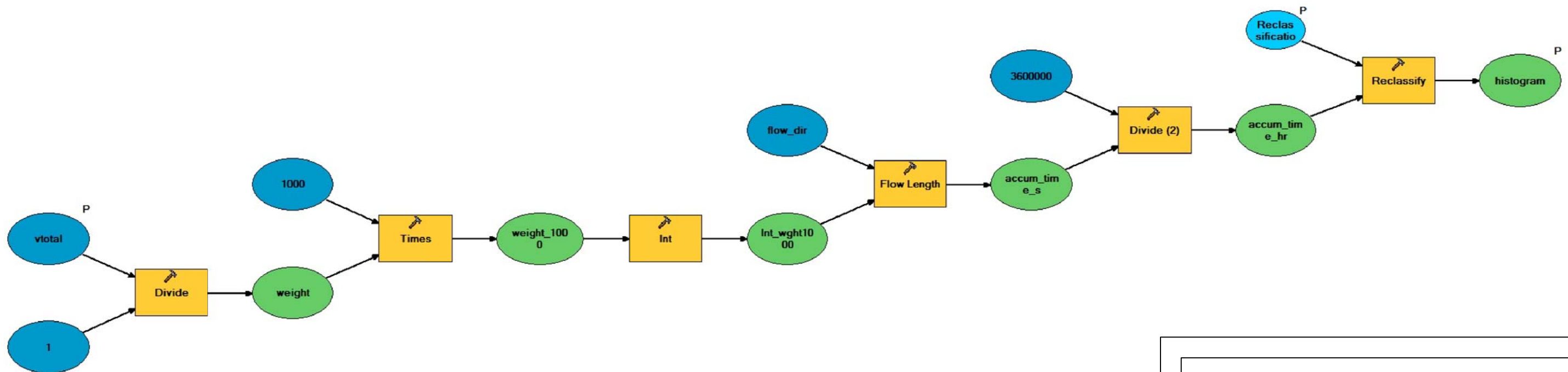


**Μοντέλο (4) Vland**  
 Δημιουργία κανάβου ταχυτήτων χερσαίας ροής

Δημιουργία τελικού κανάβου ταχυτήτων ροής - (5) Vtotal



Δημιουργία ιστογράμματος χρόνου - επιφάνειας - (6) Accum time



**Μοντέλο (5) Vtotal & Μοντέλο (6) Accum time**

Δημιουργία τελικού κανάβου ταχυτήτων ροής & Δημιουργία ιστογράμματος χρόνου - επιφάνειας