

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι προσωπική μου ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση του εν λόγω εγχειρήματος.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου κ. Νίκο Μαμάση που συναίνεσε στην ανάθεση του θέματος. Η αρχική συζήτηση μαζί του υπήρξε αρκετά κατατοπιστική στο να διαλευκάνω τα ενδιαφέροντά μου και να προβώ στην επιλογή του θέματος της εργασίας μου. Τον ευχαριστώ γενικά για τη συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Ό,τι και να αναφέρω για τον κ. Ευστρατιάδη Ανδρέα θα είναι λίγο. Τον ευχαριστώ από καρδιάς αρχικά για το ότι υπήρξε ενθουσιώδης εμπνευστής του θέματος της εργασίας μου και για το ότι καθ' όλη τη διάρκεια της παραμονής μας στο «Ελληνικό Ινστιτούτο Υδρολογίας» οι συμβουλές και η βοήθειά του υπήρξαν πολύτιμες.

Ευχαριστώ τις συμφοιτήτριες και φίλες μου Παγάνα Βάσω και Τουτζιάρη Μάγδα για την ευχάριστη παραμονή και συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια αυτών των έξι μηνών στο γραφείο του δευτέρου ορόφου.

Θα ήθελα γενικώς να απευθύνω ένα ευχαριστώ στους υποψήφιους διδάκτορες, τους διδάσκοντες και τους υπόλοιπους συνεργάτες, τους οποίους όλον αυτόν τον καιρό συναναστραφήκαμε, όχι μόνο για την όποια βοήθεια μας παρείχαν κατά τη διάρκεια της παραμονής μας στο γραφείο του δευτέρου ορόφου αλλά και για το μεράκι και την αγάπη για έρευνα που τους διακρίνει, κάτι που αποτέλεσε για μας παράδειγμα και έμπνευση.

Πάνω από όλους, ευχαριστώ την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν όλο αυτό το διαστήματος. Συγκεκριμένα ευχαριστώ τη θεία μου Μαριέττα και όλη την οικογένειά της και δικιά μου πια, τον πατέρα μου Ματθαίο, τη μητέρα μου Γεωργία, τις αδελφές μου Μαρία και Ιωάννα και φυσικά τη γιαγιά Μαρίνα για το ότι όλα αυτά τα χρόνια ανέχονται τα επιστημονικά μου καπρίτσια και με αφήνουν να σπουδάζω ακόμα!

Μαθιουδάκη Μαρίνα

Μάρτιος 2012

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	i
Περιεχόμενα.....	ii
Περίληψη	v
Extended Abstract	vii
Introduction	vii
Hydrologic design according to the theory of unit hydrograph	vii
Study area	viii
Methology	ix
Conclusion.....	xii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση εργασίας	2
2 Υδρολογικός σχεδιασμός σύμφωνα με τη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος.....	5
2.1 Παρουσίαση ενός απλού πλημμυρικού επεισοδίου	5
2.2 Υπολογισμός ενεργού βροχής	7
2.3 Μοναδιαία υδρογραφήματα	9
2.3.1 Θεωρητικό πλαίσιο	9
2.3.2 Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder	10
2.3.3 Μέθοδος Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας	13
2.3.4 Τριγωνικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα του SCS	14
2.3.5 Το λείο Μοναδιαίο Υδρογράφημα του SCS.....	15

3 Περιοχή μελέτης.....	17
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής Ραφήνας	17
3.2 Γενικά χαρακτηριστικά της υπολεκάνης Λυκορέματος Ραφήνας.....	18
3.3 Αποτελέσματα συναφών ερευνών στην περιοχή της Πειραματικής λεκάνης	22
4 Συλλογή στοιχείων και πρωτογενής επεξεργασία	25
4.1 Υδρομετρικοί και βροχομετρικοί σταθμοί	25
4.2 Επιλογή χαρακτηριστικών επεισοδίων	26
4.3 Εκτίμηση επιφανειακών καταιγίδων	27
4.3.1 Υπολογισμός συντελεστών Thiessen ευρύτερης λεκάνης	33
4.3.2 Υπολογισμός των συντελεστών Thiessen στις λεκάνες ανάντη των σταθμών Λυκόρεμα και Ντράφι	34
4.4 Υπολογισμός χρόνου συρροής κατά Giandotti.....	37
4.4.1 Ο χρόνος συγκέντρωσης κατά Giandotti.....	37
4.3.2 Υπολογισμός των σχετικών μεγεθών για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης κατά Giandotti στην περιοχή μελέτης	37
4.5 Υπολογισμός αριθμού καμπύλης απορροής (Curve Number, CN).....	39
5 Επεξεργασία επεισοδίων.....	47
5.1 Εισαγωγή.....	47
5.2 Μεθοδολογία που ακολουθήθηκε	48
5.2.1 Χρονική συσχέτιση παρατηρημένων υδρογραφημάτων με υετογράμματα	48
5.2.2 Διαχωρισμός επιφανειακής απορροής	48
5.2.3 Εκτίμηση καθαρής βροχής	49
5.2.4 Το παραμετρικό μοναδιαίο υδρογράφημα.....	50
5.2.5 Διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης παραμέτρων	53
5.3 Αναλυτική διερεύνηση επεισοδίων.....	54
5.3.1 Λεκάνη απορροής ανάντη του σταθμού στο Ντράφι	54

5.3.2 Λεκάνη απορροής ανάντη του σταθμού στο Λυκόρεμα	87
6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και σχολιασμός.....	123
6.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη λεκάνη απορροής ανάντη στο Ντράφι	123
6.1.1 Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με εφαρμογή του εμπειρικού μοναδιαίου υδρογραφήματος	123
6.1.2 Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης με άλλες μεθόδους	133
6.1.3 Αξιολόγηση αλλαγής χρονικού βήματος χρονοσειρών	136
6.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη λεκάνη απορροής ανάντη στο Λυκόρεμα	139
6.2.1 Αποτελέσματα διαδικασίας βελτιστοποίησης με εφαρμογή του εμπειρικού μοναδιαίου υδρογραφήματος	139
6.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης με άλλες μεθόδους	147
7 Συμπεράσματα	151
7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα	151
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	153
Βιβλιογραφία	157
Παράρτημα.....	159

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση μεθόδων υδρολογικού σχεδιασμού που βασίζεται στην επεξεργασία ιστορικών πλημμυρικών γεγονότων στην πειραματική λεκάνη της Ραφήνας. Αρχικά έγινε συλλογή δεδομένων βροχής και απορροής από δύο υδρομετρικούς και τέσσερις βροχομετρικούς σταθμούς στην περιοχή μελέτης και διάκριση επεισοδίων πλημμύρας βάση των μεγαλύτερων μέσων ημερησίων παροχών που έχουν παρατηρηθεί. Για κάθε επεισόδιο από τα δεδομένα βροχής έγινε αρχικά απομόνωση των συνολικών ελλειμμάτων με σκοπό την εκτίμηση του ποσού της βροχής που μετατρέπεται σε απορροή, δηλαδή της ενεργού βροχής. Για τον υπολογισμό της ενεργού βροχής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εκτίμησης συνολικών ελλειμμάτων SCS με παραμέτρους τον αριθμό καμπύλης απορροής CN και τον λόγο $a = h_{a0}/S$ όπου h_{a0} είναι το αρχικό έλλειμα και S η δυνητικά μέγιστη κατακράτηση, που εκτιμάται συναρτήσει του CN. Για τον μετασχηματισμό της βροχής σε απορροή έγινε εφαρμογή της θεωρίας του μοναδιαίου υδρογραφήματος σύμφωνα με την οποία το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα άμεσης απορροής της λεκάνης προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του ενεργού υετογράμματος με ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα. Στα πλαίσια της εργασίας έγινε χρήση υφιστάμενων συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων και ενός παραμετρικού εμπειρικού μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Από το συνδυασμό του κάθε μοναδιαίου υδρογραφήματος με το ενεργό υετόγραμμα προέκυψε ένα προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα άμεσης απορροής το οποίο συγκρίνεται με το παρατηρημένο. Για κάθε επεισόδιο έγινε αρχικά διαχωρισμός της βασικής ροής από το ολικό παρατηρημένο πλημμυρογράφημα. Για το σκοπό αυτό η αρχή της άμεσης απορροής θεωρήθηκε το σημείο όπου η ολική απορροή αυξάνει απότομα και το τέλος της άμεσης απορροής θεωρήθηκε ότι συμβαίνει σε χρόνο ίσο με τον χρόνο συγκέντρωσης μετά τη λήξη της ενεργού βροχής. Η λήξη της ενεργού βροχής θεωρήθηκε ότι ταυτίζεται με τη λήξη της ολικής βροχής.

Μετά τη χρήση των συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας και της μεθόδου Snyder με ένα υετόγραμμα ενεργού βροχής με τιμές των παραμέτρων α και CN όπως προτείνονται από τη βιβλιογραφία και τη διαπίστωση ότι το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα που προκύπτει απέχει πολύ από το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα για κάθε επεισόδιο έγινε εφαρμογή ενός εμπειρικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, το οποίο διαθέτει έναν γραμμικό ανοδικό κλάδο, με χρόνο ανόδου $t_p = \beta * t_c + d/2$, έναν καθοδικό κλάδο λογαριθμικής μορφής και χρόνο βάσης ίσο με $t_b = t_c + d$ (όπου d είναι η διάρκεια βροχής, t_c ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης και β παράμετρος). Για κάθε επεισόδιο έγινε βελτιστοποίηση των παραμέτρων α και CN της μεθόδου SCS και της παραμέτρου β του εμπειρικού μοναδιαίου υδρογραφήματος με στόχο το προσομοιωμένο πλημμυρογράφημα να προσεγγίζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το παρατηρημένο. Επίσης πραγματοποιήθηκε μία επιπλέον διερεύνηση των μελετούμενων παραμέτρων με άλλα χαρακτηριστικά μεγέθη των ιστορικών πλημμυρών προκειμένου να αποτυπωθεί η πραγματικότητα τέτοιων μεγεθών που υπεισέχονται στον υδρολογικό σχεδιασμό.

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

The subject of this postgraduate thesis is the investigation of parameters that present in existing methods of hydrologic design through the process of historical time series of discharge and rainfall. These parameters are used to compute the effective rainfall hyetograph and an empirical unit hydrograph that will be presented below.

Specifically, data have been collected from meteorological and flow measurement stations in the area of southeast Mesogaia region of the prefecture of Attiki. Through the correlation of these data, the parameters for the computation of the effective rainfall and the development of the unit hydrograph will be optimised.

HYDROLOGIC DESIGN ACCORDING TO THE THEORY OF THE UNIT HYDROGRAPH

The most reliable method of hydrologic design is the application of the theory of the unit hydrograph. The unit hydrograph is the unit pulse response function of a linear hydrologic system. It is defined as a direct run off hydrograph from usually 10 mm of excess rainfall generated uniformly over the drainage area for an effective duration D (Chow et al, 1988). According to this method, rainfalls of duration D with multiple intensity cause multiple discharge respectively. Also, the principle of stability is valid in the application of the theory of the unit hydrograph. That means that when a rainfall process of duration D ends, a new independent starts, which produces a new hydrograph. As a result, the hydrographs which are produced in this way are being overlapped and the final hydrograph has as ordinates, the sum of the ordinates of the overlapped hydrographs.

The unit hydrograph is a feature of the basin, which refers to, particularly important. Once the unit hydrograph is determined, it may be applied to find the direct runoff hydrograph, using the selected excess rainfall hyetograph. Unit hydrographs can be developed using various procedures such as the Snyder method, the method according to the British Institute of Hydrology, the triangular unit Hydrograph

according to Soil Conservation Service, the SCS dimensionless hydrograph and others.

For the estimation of the effective rainfall hyetograph, the most realistic method is the one according to Soil Conservation Service.

STUDY AREA

The study area is the X-Basin, which is located in the southern Athens area. It is a subbasin of the basin of Rafina Stream and it covers an area of 15,2 km². The northern part with outlet to the position Lykorema station has been studied independently by the whole basin with outlet to the position Drafi station.

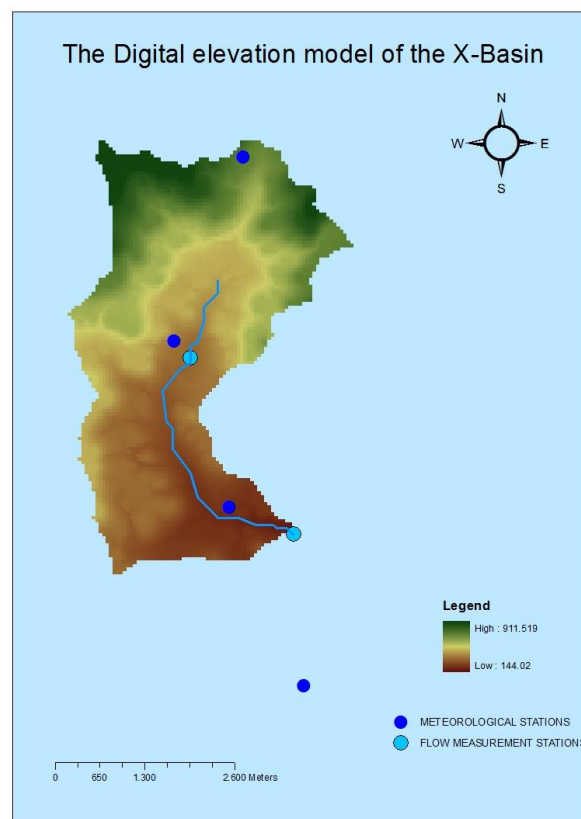


Figure 1 The digital elevation model of the study area including the positions of meteorological and flow measurement stations

The raingauge data have been collected from the hydrometeorological stations, which are located in Mpala, Agios Nikolaos, Drafi and Pikermi. The discharge data have been collected from the flowmeasurements stations which are located in

Lykorema and Drafi. Finally, 15 flood events were chosen for the basin upstream Drafi and 20 flood events for the basin upstream Lykorema.

METHODOLOGY

The aim of the procedure is to estimate for every rainfall event the optimized value of the parameters a and CN , which are used for the calculation of the effective rainfall, and the parameter b , which is used for the development of an empirical unit hydrograph.

Every flood event has been selected according to the maximum mean daily discharge from the corresponding time series of discharge in Drafi and Lykorema. During the day of the flood and also one day before and two days after the flood event, raingauge and discharge data have been recorded from every station that operated these dates. It should be mentioned that the time step of the raingauge and discharge data is 10 minutes. Then, the point raingauge data have been transferred to surface data, using the method of Thiessen polygons. Using the SCS method for the calculation of the effective rainfall, the effective rainfall ends when the total rainfall ends. The direct runoff ends after the end of the total rainfall, as long as the time concentration lasts. The time, when the direct runoff starts, is obvious at the hydrograph. Particularly, it is when the chart's gradient of the streamflow grows sharply. During the flood it is supposed that, the baseflow has a linear form, so it is easy to compute the amount of baseflow, which will be separated from the streamflow. The calculation of the effective rainfall and the empirical unit hydrograph are necessary, for the development of the simulated hydrograph.

The empirical unit hydrograph, which is developed through this study, has an upward linear sector and a downward logarithmic sector. This hydrograph has an upward linear sector with peak time:

$$t_p = b \times t_c + \frac{D}{2} \quad (1)$$

Where, b is a parameter lower than one, which will be optimized, t_c the time of concentration of the basin which is calculated according to Giandotti formula, D the duration of the rainfall

For the base time is applied the equation:

$$t_{base} = t_c + D \quad (2)$$

In this equation the definition of the time of concentration is reflected. Time concentration is defined as the time from the end of the rainfall excess till the end of the direct runoff.

The downward sector has the following form:

$$Q(t) = Q_p - k \times \ln(1 + t - t_p) \quad (3)$$

where :

Q_p the peak discharge m^3/s , k a parameter which is calculated according to the equation :

$$k = \frac{Q_p}{\ln(1 + t_{base} - t_p)} \quad (4)$$

The equation for the calculation of the peak discharge comes from the equation of the unit flood volume with the shape area of the unit hydrograph:

$$Q_p = \frac{10^4 \times A}{\frac{t_p}{2} - 1 - \frac{t_b - t_p}{\ln(t_b - t_p + 1)}} \quad (5)$$

The empirical hydrograph has the following form:

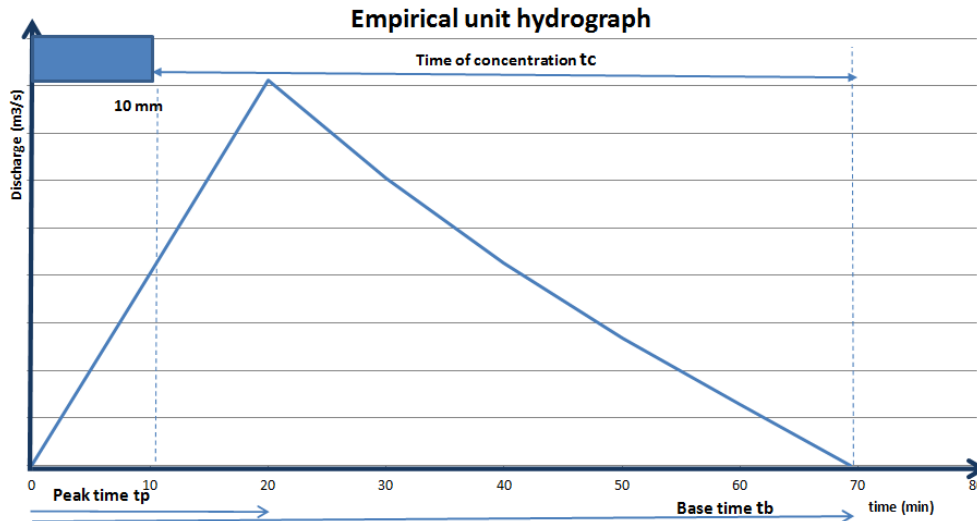


Figure 2 The empirical unit hydrograph

Using the above unit hydrograph, in combination with the excess hietograph, the simulated hydrograph is being developed.

Following, the error function is formed, which is going to be used in the optimization procedure:

$$f = SSE + 1000 \times [V_h - V_Q]^2 + 10 \times [\max Q_{obs} - \max Q_{sim}]^2 \quad (6)$$

where: $SSE = \sum_{i=1}^n (Q_e(i) - Q_{sim}(i))^2$ where i each time step, V_h the total amount of excess rainfall calculated in mm , V_Q the total amount of direct runoff calculated in mm , $\max Q_{obs}$ the maximum value of discharge in the hydrograph of observed direct runoff, $\max Q_{sim}$ the maximum value of discharge in the hydrograph of simulated direct runoff.

Firstly, the theory of the unit hydrograph will be applied using the Snyder method and the unit hydrograph according to the British Institute of Hydrology. Each one will be combined with an excess hietograph. This hietograph is calculated according to SCS method by setting the value 0,2 for the parameter a and the proper value for the parameter CN , so that V_h is equated with V_Q .

CONCLUSION

The initial aim of the present study is to investigate the values of the parameters a , CN , b for the basins upstream Drafi and Lykorema.

For the basin upstream Drafi the value of the parameter CN is varied from 40 to 50 and the value of the parameter a is varied from 0 to 0,02 for most flood events.

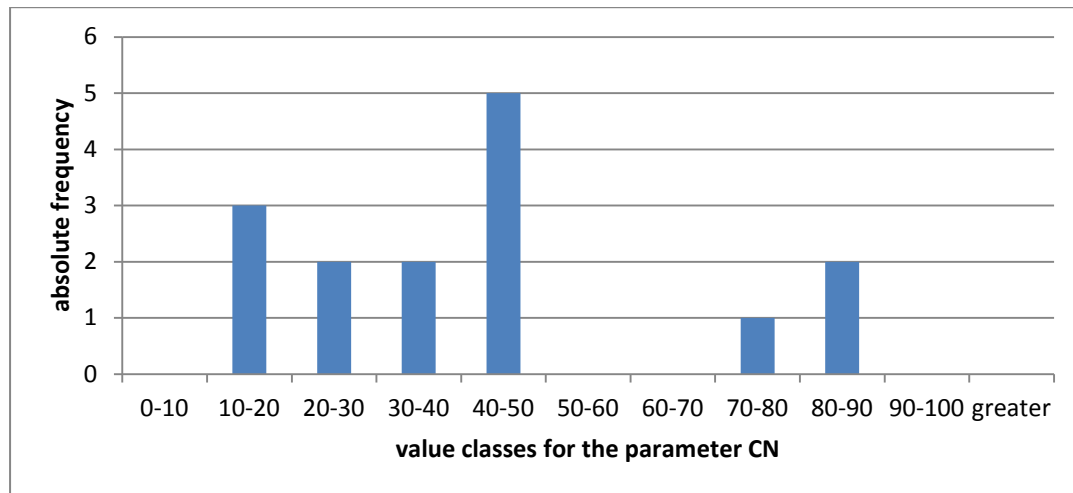


Figure 3 Empirical probability distribution for the parameter CN for the basin upstream Drafi

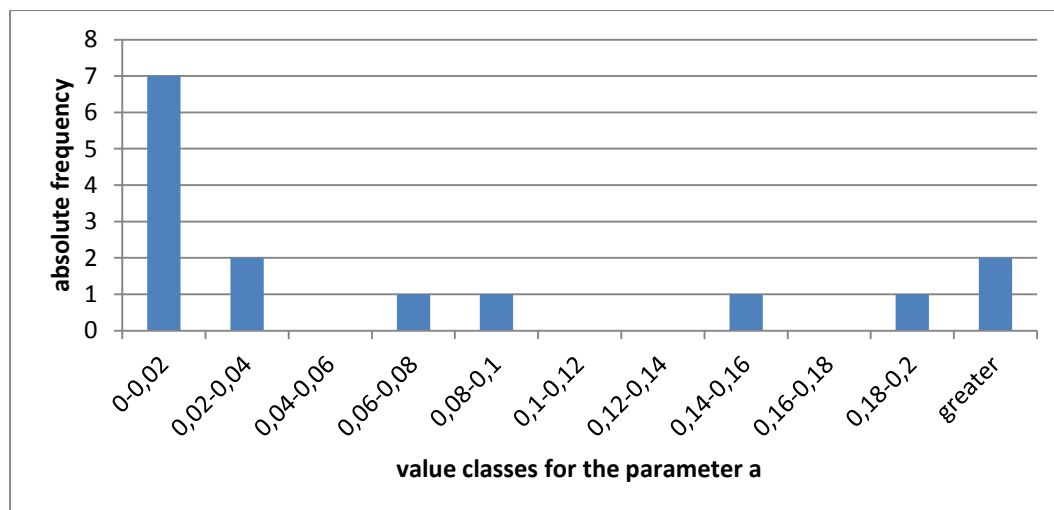


Figure 4 Empirical probability distribution for the parameter a for the basin upstream Drafi

However, it is observed that there is a correlation with the observed peak discharge for both parameters. This observation indicates that basically parameter CN

probably does not have a stable value which is characteristic of the basin. Probably, the value of the parameter CN varies similarly to the peak discharge.

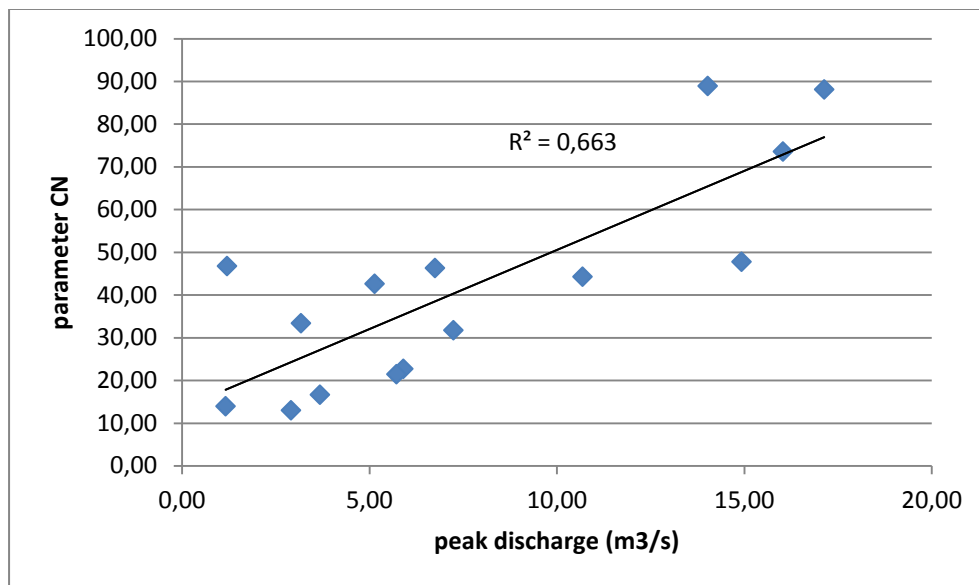


Figure 5 Chart of peak discharge- parameter CN for the basin upstream Drafi

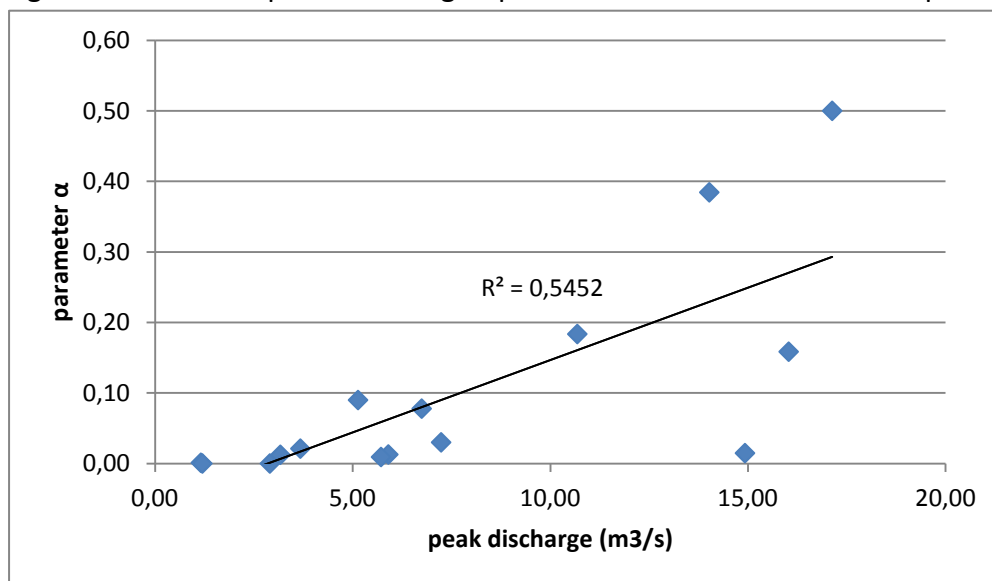


Figure 6 Chart of peak discharge - values of parameter a for the basin upstream Drafi
 For the parameter b the range which represents the basin upstream Drafi is 0,3-0,35 after the correction of the time concentration.

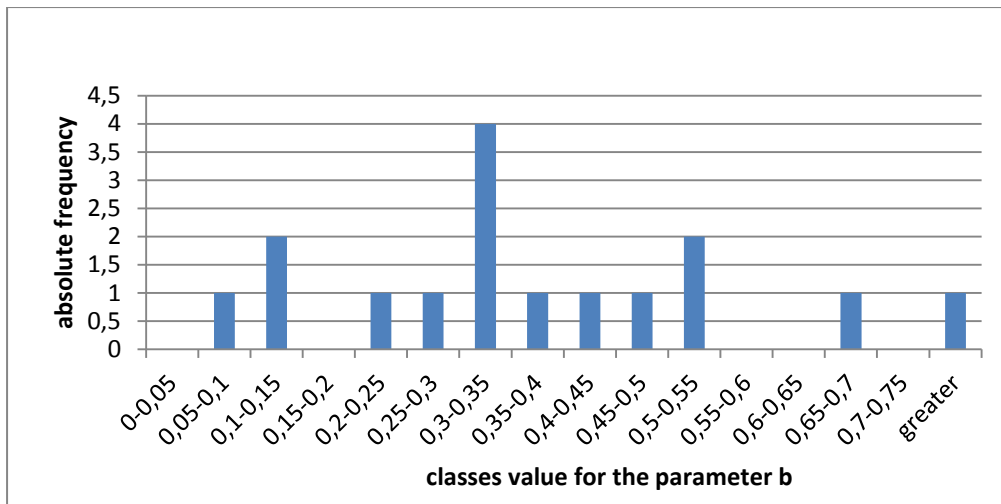


Figure 7 Empirical probability distribution for the corrected parameter b for the basin upstream Drafi

As it has been mentioned, the parameter b is presented to the development of the unit hydrograph. Thus, the unit hydrograph, which represents the basin upstream Drafi, has the following form:

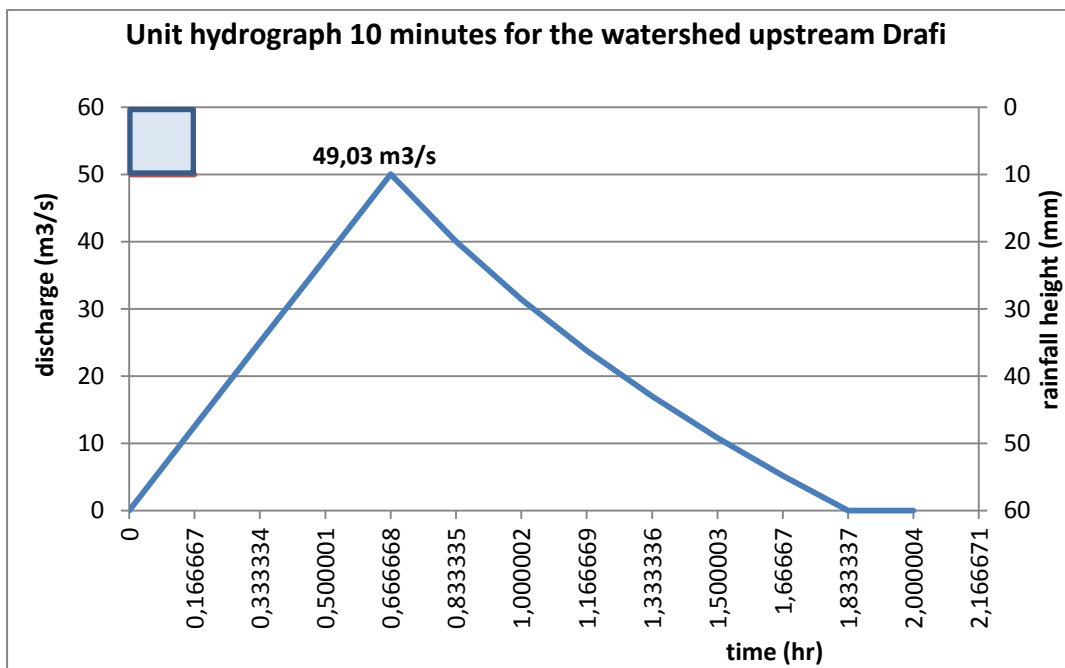


Figure 8 The unit hydrograph for a rain duration 10 minutes for the basin upstream Drafi

It should be mentioned that this hydrograph refers to the time concentration that is calculated using the empirical formula Giandotti. Nevertheless, through an

additional investigation it is observed that time concentration does not have a stable value but it depends on the peak discharge in an inversely proportional way.

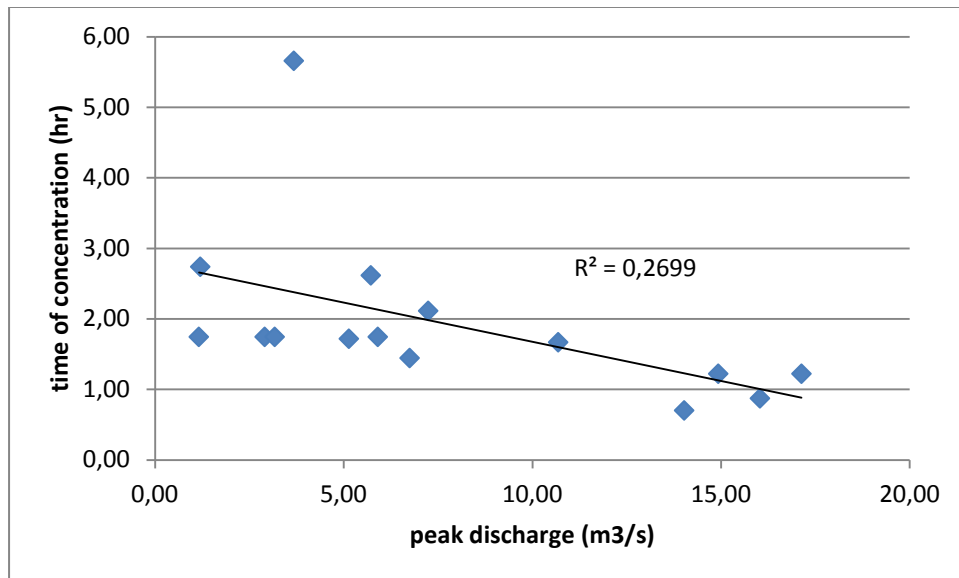


Figure 9 Chart of peak discharge - time of concentration for the basin upstream Drafi
 For the basin upstream Lykorema, which is a subbasin of the entire X-basin, the value of the parameter CN at most flood events vary from 10 to 20 and the value of the parameter a vary from 0 to 0,02.

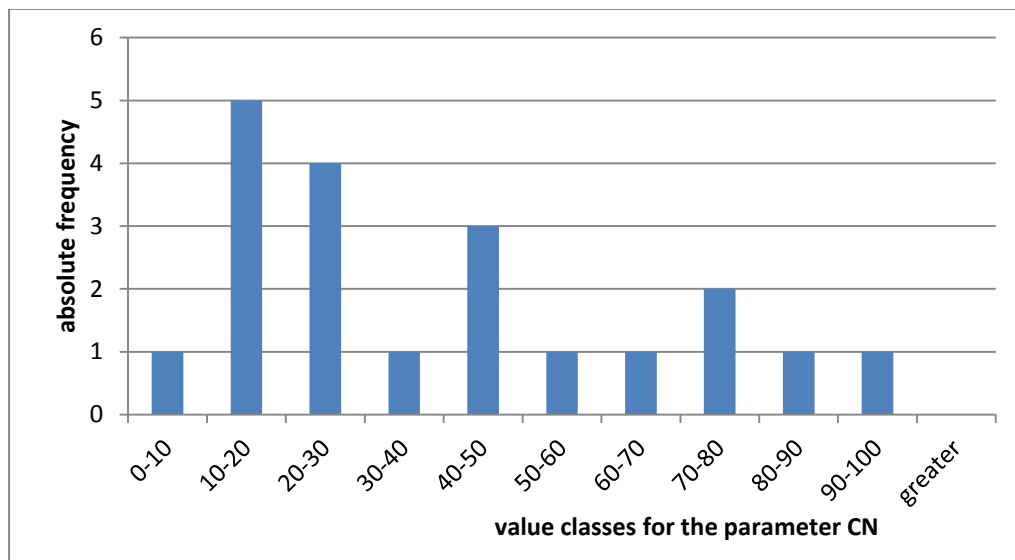


Figure 10 Empirical probability distribution for the parameter CN for the basin upstream Lykorema

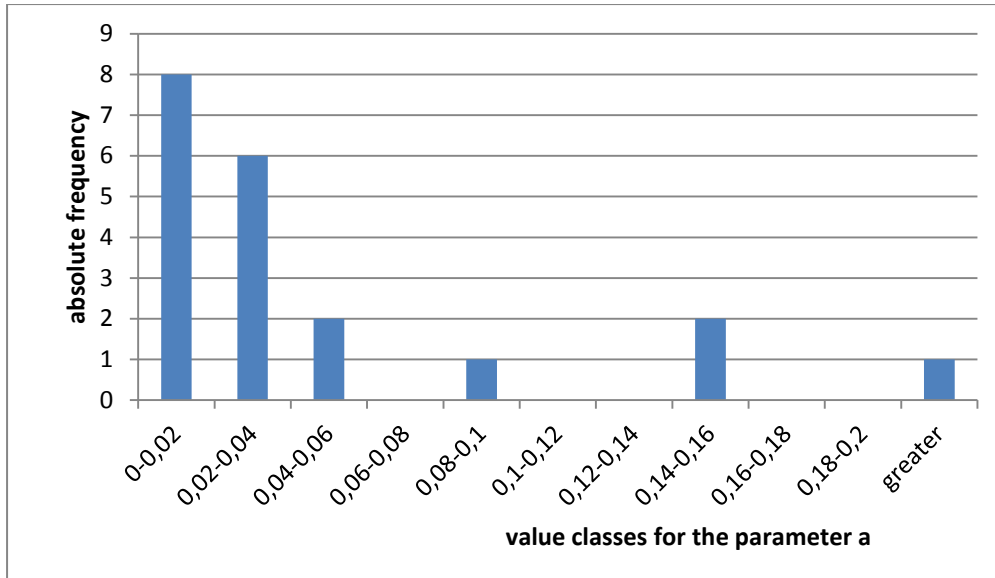


Figure 11 Empirical probability distribution for the parameter a for the basin upstream Lykorema

For this basin, it is observed that the parameter CN has a corresponding correlation with the peak discharge, as the basin upstream Drafi.

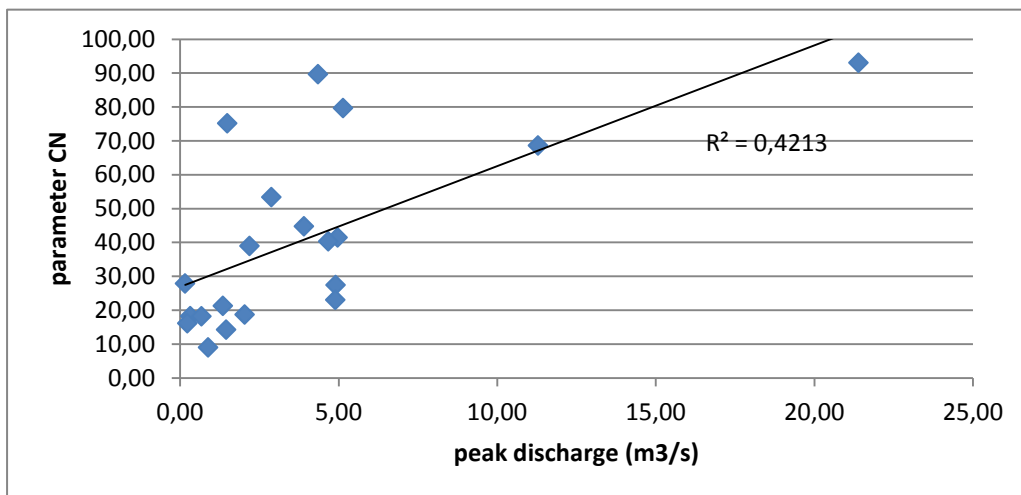


Figure 12 Chart of peak discharge-parameter CN for the basin upstream Lykorema

A corresponding correlation for the parameter a has not been found. The value of the parameter b, at most flood events, varies from 0,35 to 0,40 after the correction of time concentration.

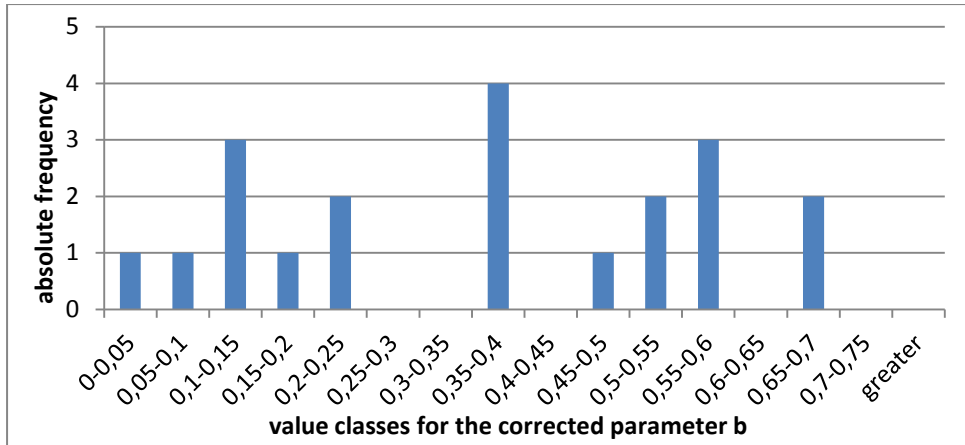


Figure 13 Empirical probability distribution for the corrected parameter b for the basin upstream Lykorema

Thus, the following empirical unit hydrograph is occurred:

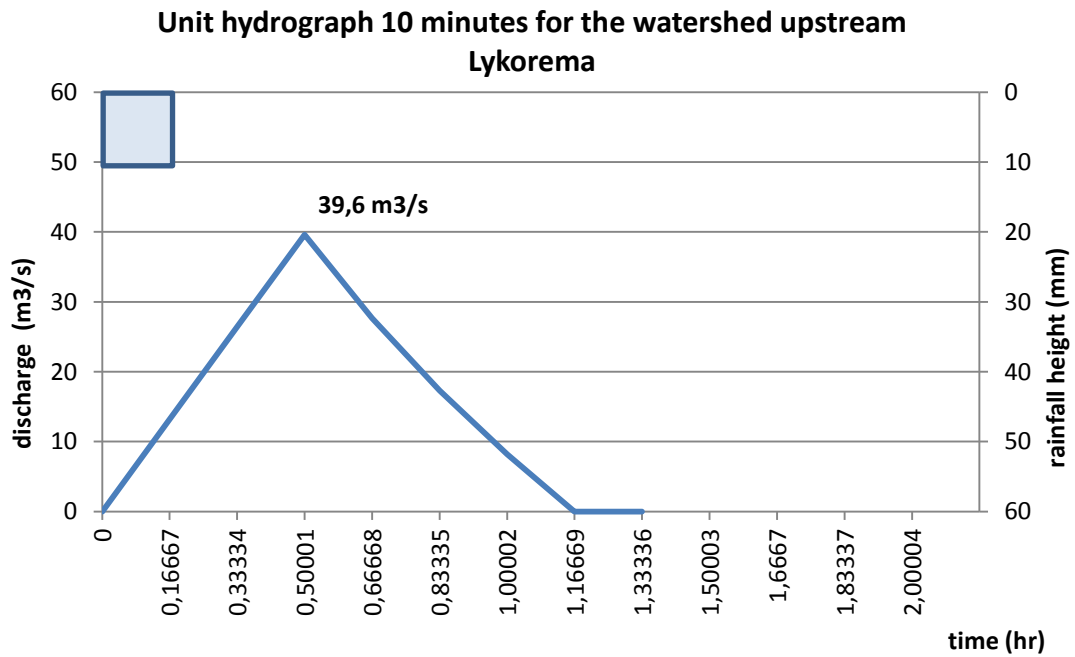


Figure 14 The unit hydrograph for a rain duration 10 minutes for the basin upstream Lykorema

This hydrograph refers to the time concentration, which is calculated using the empirical formula Giandotti. Nevertheless, through an additional investigation it is observed that time concentration does not have a stable value but it depends on the peak discharge in an inversely proportional way.

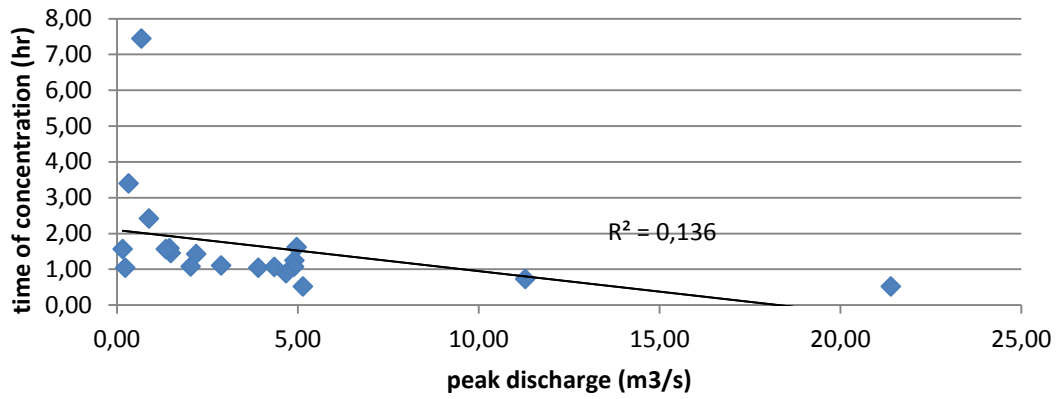


Figure 15 Chart of peak discharge-time concentration for the basin upstream Lykorema

This observation about the time concentration and the parameter CN is particularly significant since these parameters contribute to the hydrologic design through the unit hydrograph and the excess hyetograph.