



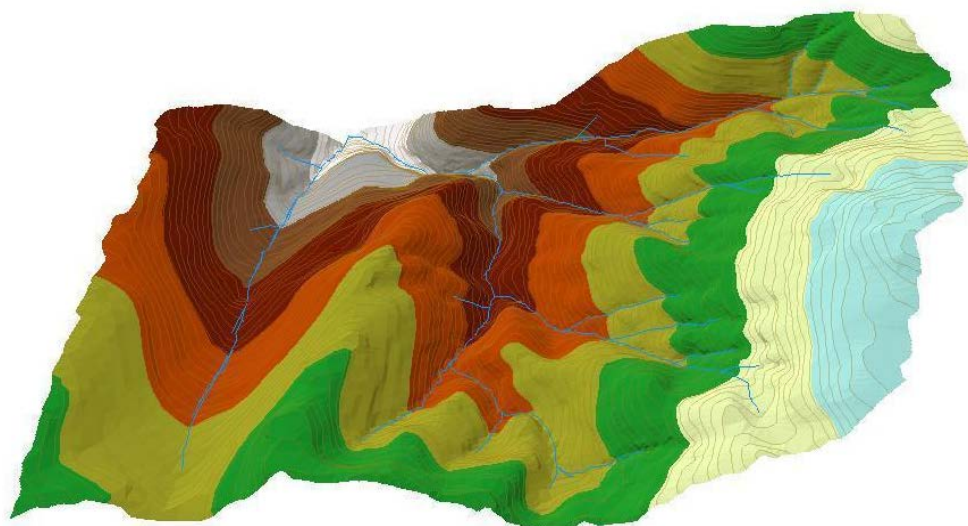
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ
ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ
ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ**



Γεωργία Α. Βαρσάμη

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Μπαλτάς Ευάγγελος

ΔΠΜΣ
«Επιστήμη &
Τεχνολογία
Υδατικών
Πόρων»

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ
ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΛΕΚΑΝΗ ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΕΥΡΥΤΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

Γεωργία Α. Βαρσάμη

Δασολόγος-Περιβαλλοντολόγος

ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Μπαλτάς Ευάγγελος, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γιακουμάκης Σπυρίδων, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Παναγούλια Διονυσία, Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο των μεταπτυχιακών μου σπουδών με την παρούσα εργασία, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της.

Πρωτίστως, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς στον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Μπαλτά Ευάγγελο, Αναπληρωτή Καθηγητή στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος, τις γνώσεις που μου προσέφερε και την πολύτιμη καθοδήγησή του.

Ευχαριστώ θερμά τα μέλη της επιτροπής αξιολόγησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας, κ. Γιακουμάκη Σπυρίδωνα, Επίκουρο Καθηγητή στον Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, και κα Παναγούλια Διονυσία, Επίκουρη Καθηγήτρια στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τον κ. Μπαριάμη Γεώργιο, Υποψήφιο Διδάκτορα στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για τη συνεχή βοήθεια, τις καίριες επισημάνσεις και την υπομονή του, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θεωρώ ιδιαίτερη υποχρέωση να ευχαριστήσω το Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ&ΤΔΠ) και ιδίως τον κ. Μπουρλέτσικα Αθανάσιο, Δασολόγο-Υδρολόγο, ειδικό τεχνικό επιστήμονα, για την παροχή δεδομένων, τις χρήσιμες συμβουλές που μου παρείχε και τη διαθεσιμότητά του σε οποιαδήποτε διευκρίνηση χρειάστηκε.

Τις πιο θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και σε όλους του διδάσκοντες του ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», τα μαθήματα των οποίων είχα την τιμή να παρακολουθήσω αποκομίζοντας ανεκτίμητες γνώσεις. Ένα επιπλέον ευχαριστώ σε όλους τους συμφοιτητές και φίλους μου από το μεταπτυχιακό για τις αξέχαστες στιγμές που περάσαμε.

Αισθάνομαι βαθιά την ανάγκη να απευθύνω, τουλάχιστον, ένα εγκάρδιο ευχαριστώ στο Ίδρυμα Μποδοσάκη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και με τίμησε με τη χορήγηση υποτροφίας για την παρακολούθηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού προγράμματος.

Κλείνοντας, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για την κατανόηση, την εμπιστοσύνη, τη θετική τους σκέψη και την κάθε είδους στήριξη που

απλόχερα μου προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια για την υλοποίηση των στόχων μου. Τους ευχαριστώ ολόψυχα γιατί μ' αγαπούν και γιατί «είναι πάντα εδώ».

Γεωργία Α. Βαρσάμη
Αθήνα, Οκτώβριος 2014

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	v
Extended Abstract	vii
1. Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός εργασίας	1
1.2 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε	1
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	2
1.4 Το υδρολογικό ισοζύγιο σε επίπεδο λεκάνης απορροής	3
1.5 Υδρολογικά μοντέλα	3
1.6 Το ζήτημα των πλημμυρών	5
1.6.1 Γενικά για τις πλημμύρες	5
1.6.2 Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK.....	6
1.6.3 Το πλημμυρικό καθεστώς σε Ευρώπη και Ελλάδα	7
1.7 Υδρολογική συμπεριφορά δασωμένων λεκανών απορροής	8
1.8 Πυρκαγιές	9
1.8.1 Χαρακτηριστικά των δασικών πυρκαγιών	9
1.8.2 Οι πυρκαγιές σε Μεσόγειο και Ελλάδα.....	10
1.8.3 Επίδραση πυρκαγιών στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής	12
2. Περιοχή μελέτης	17
2.1 Περιγραφή της λεκάνης μελέτης.....	17
2.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά.....	19
2.3 Κλιματικές συνθήκες	20
2.4 Δασική βλάστηση	24
2.5 Εξοπλισμός μετρήσεων	24
3. Υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής	29
3.1 Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση λεκάνης	30
3.1.1 Σύνθεση ψηφιακού μοντέλου εδάφους.....	31
3.1.2 Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους	32
3.1.3 Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου του HEC-HMS	37
3.2 Λογισμικό HEC-HMS	41
3.2.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής	42

3.2.1.1 Απώλειες βροχής γενικά.....	44
3.2.1.2 Εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων με τη μέθοδο SCS	44
3.2.1.3 Πρότυπο εκτίμησης απωλειών παρεμπόδισης	48
3.2.1.4 Πρότυπο εκτίμησης άμεσης απορροής.....	50
3.2.1.5 Πρότυπο εκτίμησης βασικής απορροής	54
3.2.1.6 Πρότυπο διόδευσης πλημμύρας.....	57
3.2.2 Μετεωρολογικό μοντέλο	57
3.2.3 Χρονοσειρές δεδομένων	58
3.2.3.1 Βροχομετρικά δεδομένα	59
3.2.3.2 Δεδομένα παροχών	60
3.2.4 Χρονικός έλεγχος προσομοίωσης.....	61
4. Αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης	63
4.1 Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης.....	63
4.2 Βαθμονόμηση.....	66
4.2.1 Διαδικασία βαθμονόμησης.....	66
4.2.2 Αποτελέσματα βαθμονόμησης.....	68
4.3 Επαλήθευση.....	71
4.3.1 Προετοιμασία επαλήθευσης.....	72
4.3.2 Αποτελέσματα επαλήθευσης.....	73
5. Διαμόρφωση σεναρίου πυρκαγιάς.....	75
5.1 Καθορισμός υδρολογικών παραμέτρων μετά την πυρκαγιά.....	75
5.1.1 Επαναπροσδιορισμός αριθμού καμπύλης CN.....	75
5.1.2 Επαναπροσδιορισμός αρχικών απωλειών	77
5.1.3 Επαναπροσδιορισμός χρόνου υστέρησης.....	78
5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου πυρκαγιάς	78
6. Συμπεράσματα.....	81
6.1 Βαθμονόμηση.....	81
6.2 Επαλήθευση.....	82
6.3 Σενάριο πυρκαγιάς.....	82
6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	82
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	85

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η υδρολογική προσομοίωση ορεινής δασικής λεκάνης απορροής με χρήση του προγράμματος HEC-HMS και η εκτίμηση της μεταβολής της υδρολογικής απόκρισης μετά από ενδεχόμενη πυρκαγιά. Η περιοχή μελέτης οριοθετείται στο ελατοδάσος Αγίου Νικολάου Ευρυτανίας και έχει έκταση 1,45 km². Αποτελεί μία από τις τρεις πειραματικές λεκάνες του Ινστιτούτου Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ&ΤΔΠ), από το οποίο και παραχωρήθηκαν τα βροχομετρικά και σταθμηγραφικά δεδομένα. Η εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης έγινε σε επίπεδο επεισοδίου βροχής με στόχο την εκτίμηση των πλημμυρικών μεγεθών.

Η ανάλυση των γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της εξεταζόμενης περιοχής πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS, μέσω της πρόσθετης εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS, που επιτρέπει τη δημιουργία αρχείων εισόδου σε λογισμικά υδρολογικών μοντέλων. Για την προσομοίωση των επιμέρους συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου έγινε επιλογή των κατάλληλων μεθόδων από ένα σύνολο δυνατοτήτων που διαθέτει το πρόγραμμα HEC-HMS. Τα αρχικά ελλείμματα εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθόδου του αριθμού καμπύλης της Soil Conservation Service - SCS (πλέον Natural Resources Conservation Service - NRCS), η άμεση απορροή με τη μέθοδο του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος της SCS και η βασική απορροή με το πρότυπο εκθετικής μείωσης. Επιπλέον, λόγω του δασικού χαρακτήρα της λεκάνης ενσωματώθηκε στο μοντέλο και πρότυπο για την εκτίμηση των απωλειών παρεμπόδισης.

Η υδρολογική προσομοίωση υλοποιήθηκε σε δύο μεμονωμένα γεγονότα βροχής (1/7/2001 και 29/8/2002), όπου και υπολογίστηκαν τα υδρογραφήματα εξόδου για κάθε επεισόδιο. Ακολούθησε η διαδικασία της βαθμονόμησης, χρησιμοποιώντας ως μέτρο προσαρμογής το δείκτη Nash-Sutcliffe, και η επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου με ένα τρίτο επεισόδιο βροχόπτωσης (24/10/2003).

Τελικό στάδιο της εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της υδρολογικής συμπεριφοράς της υπό μελέτη λεκάνης με την κατασκευή ενός σεναρίου πυρκαγιάς, ώστε να ελεγχθεί η μεταβολή της πλημμυρικής απορροής μετά τη φωτιά σε μία κατ'έξοχήν δασική έκταση.

Για την ανάλυση των επιδράσεων της μελετώμενης πυρκαγιάς θεωρήθηκε αναγκαίος ο επαναπροσδιορισμός των παραμέτρων του μοντέλου, με βάση αντίστοιχα αποτελέσματα

μελετών της διεθνούς βιβλιογραφίας, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν στη συγκεκριμένη περιοχή.

Extended Abstract

Floods and forest fires are considered to be two of the most common natural disasters, causing many times irreversible impacts to the environment. In the last decades, both disasters present an upward tendency and are ranked especially high in the agenda of the European Environment Agency.

Large scale fire events affect the hydrological behavior of natural catchments by altering their land cover. This phenomenon is very common in the Mediterranean areas, which are more vulnerable to such hazards. Forested areas that have suffered from fire events are even more prone to floods, as drastic changes occur in the hydrologic, hydraulic and geomorphologic characteristics of drainage basins.

The aim of this postgraduate thesis is the simulation of the hydrological response of a small mountainous forest watershed before and after a possible fire, through the use of the HEC-HMS software package. The study area is located in the Agios Nikolaos fir forest, which belongs administratively to the Municipality of Karpenisi in the Prefecture of Sterea Ellada. It is one of the three experimental watersheds of the Institute of Mediterranean Forest Ecosystems and Forest Products Technology (FRIA) and covers an area of 1,45 km². The streams that cross the study area flow into River Vroussos, which is one of the main tributaries of River Karpenisiotis, the main river. The studied watershed is of great hydrological research interest, due to its mountainous and forest nature among other elements.

HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension), as developed by the Hydrologic Engineering Center (HEC) of the US Army Corps of Engineers (USACE), is used to analyze the geomorphological and hydrological characteristics of the study area and also to create the basin model. It is an extension toolbox to ESRI's ArcGIS software that allows users to produce the background support files which are necessary for the hydrologic model. The program also has the tools to demonstrate spatial characteristics, such as the river shape and the subbasin's attributes. The Digital Elevation Model (DEM) of the study area is a prerequisite for developing the basin model, though in this case it was not available before the beginning of the study. Hence, we have created a raw DEM (Figure 1) from maps (1:5000) provided by the Hellenic Military Geographical Service.

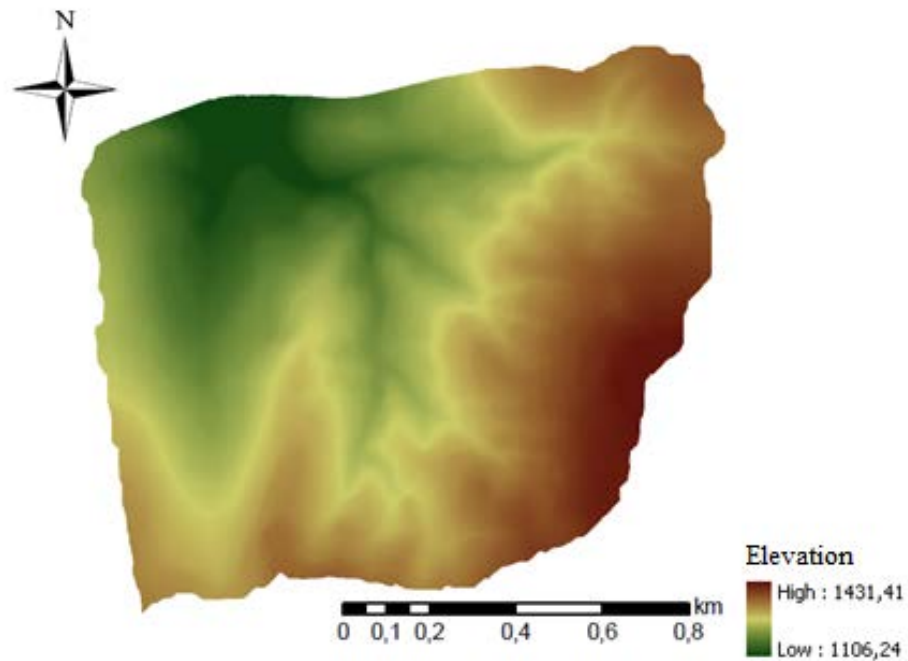


Figure 1: Digital Elevation Model of the study area

The required tasks in order to extract the necessary data for HEC-HMS were:

- DEM preprocessing
- Basin processing and extracting hydrological and geomorphological characteristics
- Selection of models to estimate the hydrological parameters and the development of HEC- HMS input files

The final outcome of the study area model shows the three (3) subbasins that were developed (Figure 2).

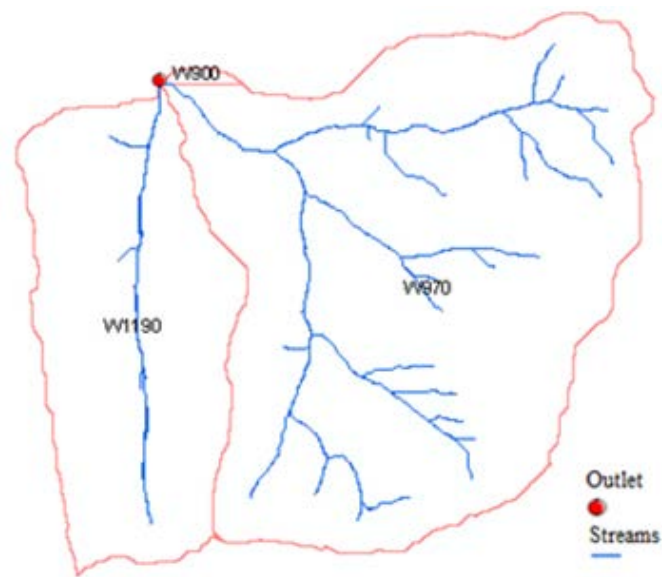


Figure 2: Watershed delineation

The Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) has been applied to simulate the precipitation-runoff processes. HEC-HMS was designed and developed by the US Army Corps of Engineers' Hydrologic Engineering Center and is a software platform that provides a range of model options to simulate different parts of the hydrological cycle. HEC-HMS can support both long term hydrological year and event based modeling.

The developed HEC-HMS model was an event-based simulation that run for two rainfall events (1/7/2001 & 29/8/2002). All the necessary rainfall and runoff data have been acquired by the FRIA, through measuring tapes. The observed flow data were collected from a flow measuring station, located in the outlet of the studied basin, while rainfall measures were received by a rain gauge located 70 m away from the basin. The precipitation graphs (Figure 3 & 4) refer to the two simulated events (1/7/2001& 29/8/2002).

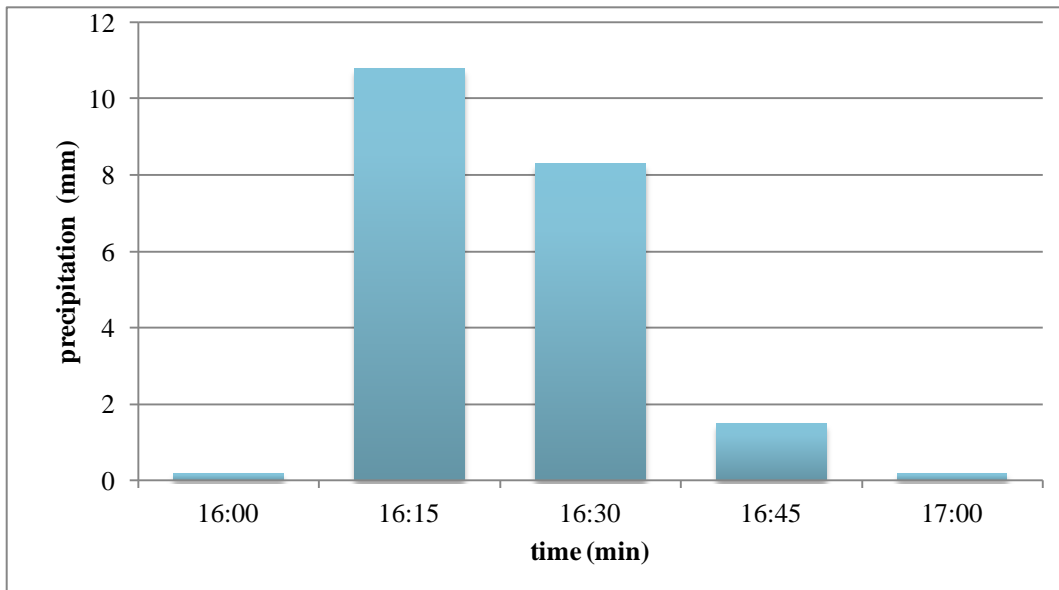


Figure 3: Precipitation graph for 1/7/2001 rainfall event

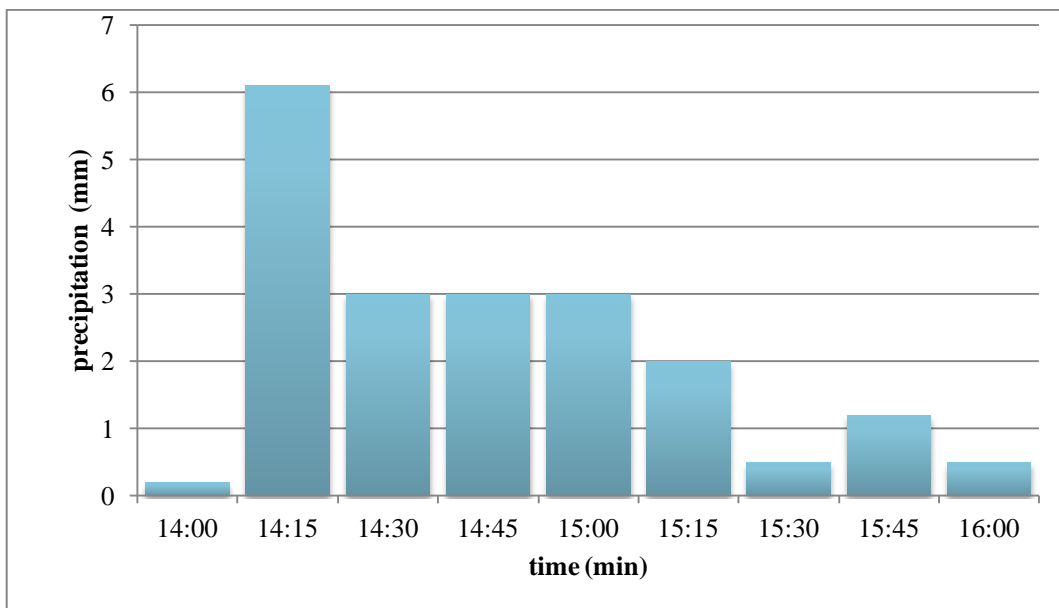


Figure 4: Precipitation graph for 29/8/2002 rainfall event

The representation of watershed hydrologic processes was based in the formulation of models for the computation of rainfall losses, direct runoff and baseflow. There are many methods to compute the different models. The selection of methods was mainly determined by the shortage of reliable data of the region. Consequently, the SCS (now NRCS) Curve Number method was applied for the estimation of rainfall losses, the SCS Dimensionless Unit Hydrograph for the estimation of direct runoff and the recession baseflow method to approximate the typical behavior observed in the watershed when channel flow recedes exponentially after an event. Moreover, the simple canopy method was integrated in the model, due to its ability to represent the presence of plants in the landscape.

The total output of the aforementioned procedure was the hydrograph in the outlet of the basin. It has to be noted that, compared to the initial assumptions, there were discrepancies among the simulation results and the observed flood hydrographs as well as an under-evaluation of all hydrological values.

Model calibration is the process of modifying the input parameters to a simulation model until the output from the model matches to the maximum extent possible with the observed runoff data. The model parameters that were calibrated are the curve number (CN) and the I_a/S ratio of the SCS loss method, the lag time of the SCS unit hydrograph and the ratio to peak in baseflow method. The initial abstractions (I_a) were overrated compared to the common values ($I_a=0,2S$), according to the SCS methodology. According to Hawkins et al. (2002), a I_a/S value of about 0.05 is more accurate and adapts better to the models. In addition, the calibrated values of the lag time showed significant variation compared to the initial smaller values as obtained from the empirical relationship of the SCS. Therefore, the best results were accomplished by reducing the initial abstractions of the model and increasing the lag time of each subbasin (Figures 5 & 6). Goodness-of-fit of the calibrated model was evaluated using the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient.

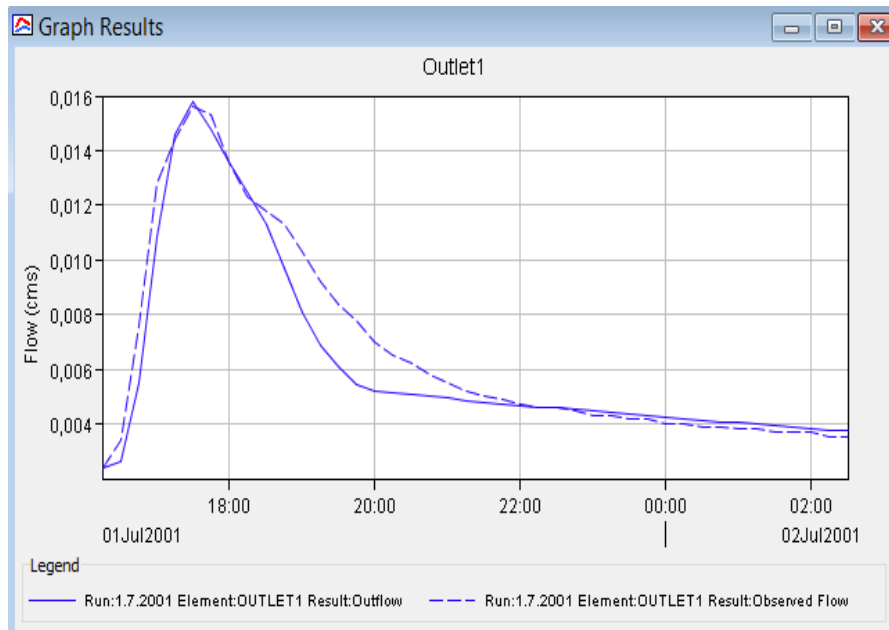


Figure 5: Calibrated hydrograph for 1/7/2001 rainfall event-
Nash-Sutcliffe: 0.92

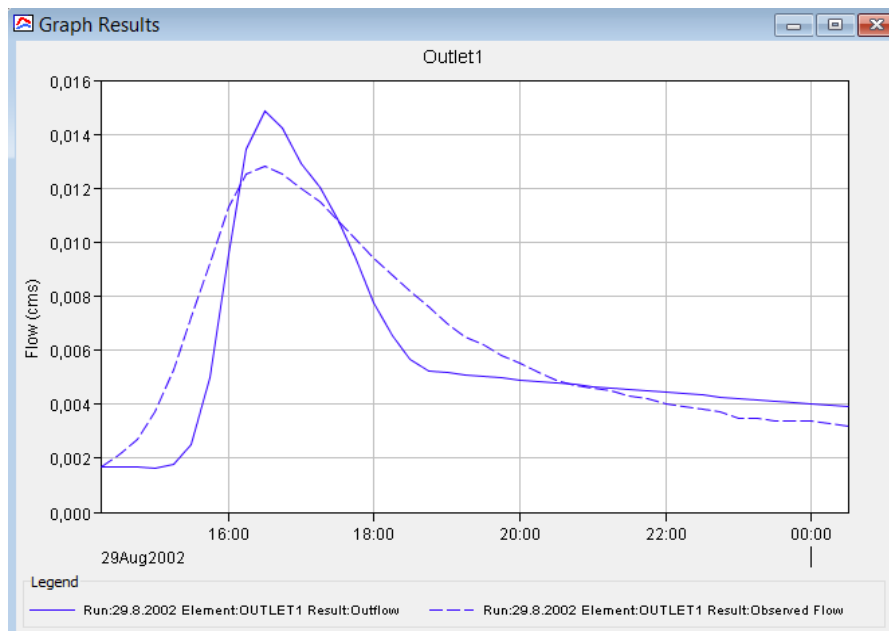


Figure 6: Calibrated hydrograph for 29/8/2002 rainfall event-
Nash-Sutcliffe: 0.8

Model validation is a process of demonstrating a model's ability to simulate observed data with acceptable accuracy, for different time periods (mainly after calibration). During this process, the parameter values of the calibrated model were being kept constant. The validation of the model was performed with the rainfall event of the 24th of October 2003. In this task, the input validation data was an average value of the hydrologic parameters calibrated for the rainfall events in 1/7/2001 and 29/8/2002. The model performance was evaluated quantitatively again, using the Nash-Sutcliffe criterion.

Table 1: Average values of calibrated parameters

SUBBASIN	CN	Ia/S	Lag Time (min)	Ratio to Peak
W970	71	0.06	80	0.29
W900	71	0.06	10	0.29
W1190	71	0.06	35	0.29

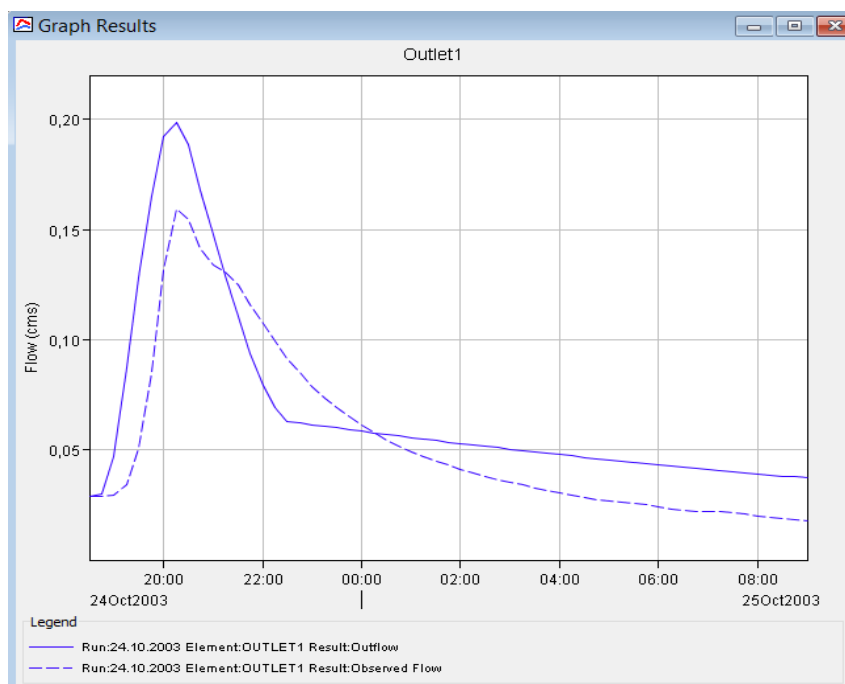


Figure 7: Validated hydrograph for 24/10/2003 rainfall event

Table 2: Validation results for 24/10/2003 rainfall event

RAINFALL EVENT 24/10/2003		
	OBSERVED VALUES	VALIDATED VALUES
Q_{PEAK} (m³/s)	0.16	0.2
TIME OF PEAK	24/10/2003, 20:15	24/10/2003, 20:15
VOLUME (m³)	2888	3542
<u>Nash-Sutcliffe: 0.6</u>		

From the above, an overestimation of the total outflow volume and the peak flow discharge are observed by 22,7% and 24,7% accordingly.

The watershed's response to rainfall events, after a fire, is governed by many factors interacting with each other, such as fire intensity, vegetation cover, soil properties, soil moisture content, rainfall intensity and time interval between the burning and the meteoric event. In addition, it must be considered that fire can change soil properties, inducing the formation of a water repellent layer at or near the soil surface, reducing soil infiltration capacity, increasing overland flow and accelerating surface erosion (Letey, 2001).

A scenario of a wildfire event was formulated, in order to assess the hydrological response in the watershed follows the impact of the fire. Considering that Greek forest areas are quite vulnerable to fires due to the weather conditions during summer and the fact that the study area is covered by Mediterranean conifer forests - which are among the most flammable and prone to forest fires - the basin planned to be completely burned and thus have a 0% forest coverage after the fire. Therefore we have investigated the behavior of a burnt afforested catchment.

In this study a systematic literature review has been conducted in order to explore the hydrological parameters after the fire effect: curve number, initial abstractions and lag time. The values of the curve numbers were defined in proportion with the land use and hydrology soil group, in accordance with Goodrich's results and the initial abstraction, according to the new curve numbers' values. The value of lag time was defined based on literature review and was reduced by 40% compared with its pre-fire values. The analysis of the hydrological response was based on the event on 24/10/2003. The presented hydrological response of the basin had crucial changes after the fire event. The simulated pre-fire and post-fire hydrographs resulting from the HEC-HMS model and are presented below.

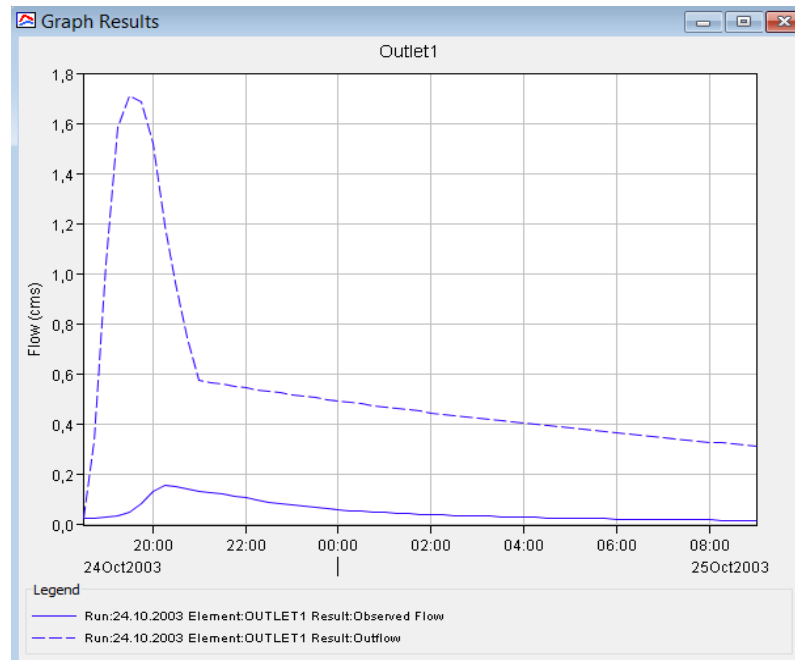


Figure 8: Simulation results for the fire scenario

Table 3: Comparison between pre-fire and post-fire values

	RAINFALL EVENT 24/10/2003	
	PRE-FIRE	POST-FIRE
Q_{PEAK}(m³/s)	0.16	1.71
TIME OF PEAK	24/10/2003, 20:15	24/10/2003, 19:30
VOLUME (m³)	2888	28615

As shown above, significant changes are observed in all hydrologic values; a tenfold increase appears in the peak flow discharge and in the total outflow volume, while the peak flow occurrence time is reduced by 45 min.

To sum up, data availability of hydrologic parameters in the study area makes the simulation procedure better and more accurate, while also decreases the possible uncertainties of the hydrologic response. Further research on the studied subject could explore alternative methods for the computation of losses, direct runoff and baseflow, as provided by the HEC-HMS and conclusions could be drawn on the basis of their suitability.

Other potential research subjects could examine in depth the model's calibration and validation procedure through the study of more rainfall events, which would improve the performance of the model as well as reduce uncertainty. Moreover, the baseflow mechanism

of the model could be further explored in order to perform a more integrated analysis of the study area hydrologic regime.

The suggested methodology, regarding the fire scenario, should be implemented and further enhanced with data of similar watersheds in order to confirm its robustness and increase its accuracy and universality.

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός εργασίας

Οι πλημμύρες και οι δασικές πυρκαγιές παρουσιάζουν μια αυξητική τάση τις τελευταίες δεκαετίες. Αποτελούν τις δύο συχνότερες φυσικές καταστροφές, με τεράστιες κοινωνικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Προς την κατεύθυνση της αντιμετώπισης του αυξανόμενου προβλήματος των πλημμυρών, έχει θεσπιστεί και εφαρμόζεται με την Οδηγία 2007/60/EK το ευρωπαϊκό πλαίσιο για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες. Η συσχέτιση των πυρκαγιών με την αύξηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας, καθιστούν αναγκαία την εκτίμηση της μεταβολής της υδρολογικής απόκρισης μιας λεκάνης απορροής μετά την επίδραση της φωτιάς, ιδίως στις μεσογειακές περιοχές που, λόγω των χαρακτηριστικών κλίματος και βλάστησης, είναι επιρρεπείς σε τέτοιους κινδύνους.

Μια δασωμένη λεκάνη απορροής έχει τη δυνατότητα να συγκρατεί σημαντικό ύψος βροχής ενός επεισοδίου, ικανού να δημιουργήσει πλημμυρικά φαινόμενα. Συνεπώς, η εκδήλωση πλημμύρας είναι πιθανότερη και με δυσμενέστερες συνέπειες σε μία δασική λεκάνη η οποία έχει ήδη πληγεί από μία πυρκαγιά μεγάλης κλίμακας, επιδρώντας καθοριστικά στην υδρολογική της συμπεριφορά.

Στόχο της μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η υδρολογική προσομοίωση ορεινής δασικής λεκάνης απορροής με την εφαρμογή ημικαταμεμημένου, εννοιολογικού, προσδιοριστικού υδρολογικού μοντέλου και η εκτίμηση της μεταβολής του υδρολογικού καθεστώτος μετά από ενδεχόμενη πυρκαγιά, σε μια πρωτίστως δασική έκταση.

1.2 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Για την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας έγινε χρήση των ακόλουθων προγραμμάτων :

- ArcGIS 9.3 (Geographic Information System) – Environmental Systems Research Institute (ESRI): Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών για απεικόνιση, επεξεργασία και ανάλυση γεωγραφικών δεδομένων

- HEC-GeoHMS 5.0 (Geospatial Hydrologic Modeling Extension) – US Army Corps of Engineers' Hydrologic Engineering Center : πρόσθετη εργαλειοθήκη του λογισμικού ArcGIS
- HEC-HMS 3.5 (Hydrologic Modeling System) – US Army Corps of Engineers' Hydrologic Engineering Center: πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης
- Google Earth
- Microsoft Office 2007

Τα παραπάνω προγράμματα της USACE και το Google Earth αποτελούν ελεύθερο λογισμικό και είναι διαθέσιμα για κάθε χρήστη.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Συνοπτικά, η δομή των κεφαλαίων που ακολουθούν θεμελιώνεται στους εξής άξονες :

- Βασικά θεωρητικά στοιχεία για την υδρολογία πλημμυρών
- Σύντομη αναφορά στην Οδηγία 2007/60/ΕΚ
- Το καθεστώς των πλημμυρών στην Ελλάδα
- Το ζήτημα των δασικών πυρκαγιών και η επίδρασή τους στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής
- Περιγραφή της περιοχής μελέτης και του εξοπλισμού μετρήσεων
- Παραγωγή Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους, γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου για την υδρολογική προσομοίωση μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS του ArcGIS
- Επιλογή των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση των επιμέρους διεργασιών του κύκλου μιας πλημμύρας, εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης και εξαγωγή υδρογραφημάτων σε περιβάλλον HEC-HMS
- Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου με σκοπό τη σύγκλιση προσομοιωμένων και παρατηρημένων πλημμυρογραφημάτων
- Επαλήθευση υδρολογικού μοντέλου με σύγκριση ανεξάρτητου πλημμυρογραφήματος με τα αντίστοιχα του μοντέλου, χωρίς περαιτέρω μεταβολή των παραμέτρων
- Διαμόρφωση σεναρίου πυρκαγιάς και επαναπροσδιορισμός υδρολογικών παραμέτρων
- Εκτέλεση υδρολογικής προσομοίωσης και έλεγχος της υδρολογικής απόκρισης μετά την υπό μελέτη πυρκαγιά
- Συμπεράσματα και προτάσεις

1.4 Το υδρολογικό ισοζύγιο σε επίπεδο λεκάνης απορροής

Το υδρολογικό ή υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής είναι η μαθηματική έκφραση του υδρολογικού της κύκλου. Αποτελεί ουσιαστικά τον υπολογισμό του νερού που εισέρχεται, εξέρχεται και αποθηκεύεται σε ένα υδρολογικό σύστημα. Από τις υδρολογικές διεργασίες του κύκλου του νερού, σημαντικές για την τεχνική υδρολογία και το υδρολογικό ισοζύγιο σε επίπεδο λεκάνης απορροής, είναι διαδικασίες της κατακρήμνισης, της διήθησης/κατακράτησης και της εξατμισοδιαπνοής.

Εισροές στη λεκάνη αποτελούν τα κατακρημνίσματα, οι εκροές γειτονικών λεκανών και οι πηγές, ενώ εκροή συνίσταται από την επιφανειακή, ενδιάμεση και υπόγεια απορροή, καθώς και την εξατμισοδιαπνοή. Η αποθήκευση της λεκάνης έχει κι αυτή διάφορες συνιστώσες, όπως είναι η επιφανειακή αποθήκευση, η υπεδάφια αποθήκευση, η υπόγεια αποθήκευση και η παρεμπόδιση. Οι παραπάνω παράγοντες συνοψίζονται στην ακόλουθη βασική εξίσωση υδρολογικού ισοζυγίου:

$$\Delta S = P - R - G - E - T \quad (1.1)$$

Σύμφωνα με αυτήν, η μεταβολή στην αποθηκευτικότητα μιας λεκάνης απορροής είναι ίση με την ποσότητα νερού που πέφτει με τη μορφή κατακρήμνισης P , μείον την ποσότητα νερού που απορρέει επιφανειακά R , απορρέει υπόγεια G , εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα E και διαπνέεται από τα φυλλώματα της βλάστησης T . Για μεμονωμένα επεισόδια βροχόπτωσης, οι συνιστώσες της εξάτμισης E και της διαπνοής T είναι αρκετά μικρότερες από τις υπόλοιπες και συνήθως αμελούνται (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006).

Η παράλειψη των συνιστωσών των υδρολογικών ελλειμμάτων (κατακράτησης και διήθησης) στην εξίσωση υδατικού ισοζυγίου είναι συνήθης σε μεγάλη χρονική κλίμακα (ετήσια ή υπερετήσια), διότι το τμήμα των ελλειμμάτων αυτών μετατρέπεται τελικά σε εξατμισοδιαπνοή ή απορροή. Σε μικρή χρονική κλίμακα, για παράδειγμα ωριαία ή ημερήσια, τα υδρολογικά ελλείμματα λαμβάνονται υπόψη ως συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου.

1.5 Υδρολογικά μοντέλα

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που 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 μοντέλα αυτά περιγράφουν (Ευστρατιάδης, 2008):

- Μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας, όπου η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών συνήθως προσεγγίσεων, στις οποίες αγνοούνται οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου που δεν ενδιαφέρουν στη μελέτη, όπως η εξάτμιση και η διήθηση.
- Τη διαχρονική εξέλιξη του ισοζυγίου των υδατικών πόρων μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (π.χ. μιας λεκάνης απορροής), όπου η διαδικασία διέπεται εν μέρει από κάποιο φυσικό υπόβαθρο και χρησιμοποιούνται εργαλεία προσομοίωσης, μέσω των οποίων αναπαρίστανται οι κύριες, τουλάχιστον, διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού.

Η πολυπλοκότητα τόσο στο μηχανισμό γένεσης, όσο και στην ποιοτική και ποσοτική εκτίμηση των εναλλαγών μεταξύ των υδρολογικών μεταβλητών, είναι η βασική αιτία προσπαθειών ανάπτυξης ομοιωμάτων-μοντέλων για την καλύτερη προσομοίωση του φυσικού φαινομένου. Τα μοντέλα παρουσιάζουν κυρίως δύο είδη λαθών (Μιμίκου 2006):

- Όταν δεν περιέχουν τον απαιτούμενο αριθμό μεταβλητών, οπότε δεν μπορούν να αναπαράγουν το φυσικό φαινόμενο ικανοποιητικά
- Όταν οι υποτιθέμενες σταθερές παράμετροι τους μεταβάλλονται συστηματικά ή τυχαία

Τα υδρολογικά μοντέλα μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες βάσει διάφορων κριτηρίων. Με κριτήριο το μέσο ανάλυσης και προσομοίωσης, δύναται να χωριστούν σε: μαθηματικά, φυσικά και ομοιώματα υπολογιστή. Κάθε μια απ' αυτές τις κατηγορίες έχει περαιτέρω υποδιαιρέσεις (Πίνακας 1.1).

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες υδρολογικών ομοιωμάτων (Πηγή: Μιμίκου, 2006)

Μαθηματικά ομοιώματα	Φυσικά ομοιώματα	Ομοιώματα υπολογιστή
Προσδιοριστικά Πιθανολογικά Στοχαστικά (Δυναμικά) Όχι στοχαστικά Προσδιοριστικά-πιθανολογικά	Ηλεκτρικά Μηχανικά Υδραυλικά Εργαστηριακά	Ηλεκτρονικά αναλογικά Ψηφιακά Αριθμητικά Όχι αριθμητικά Μαθηματικής λογικής

Μια άλλη κατάταξη των ομοιωμάτων με βάση κριτήρια που σχετίζονται με τη χωρο-χρονική κλίμακα εξέλιξης, τη δομή των μεταβλητών και τον τρόπο προσέγγισης των φυσικών διεργασιών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Κατάταξη υδρολογικών ομοιωμάτων (Πηγή: Μιμίκου, 2006, Wanielista et al., 1997)

<p>I. <i>Με βάση τη χωρική κλίμακα</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Αδιαμέριστα ή Συγκεντρωτικά (lumped). Η υδρολογική λεκάνη αποτελεί μια ενιαία χωρική ενότητα (ίδια βροχόπτωση, θερμοκρασία κ.λ.π.). • Ημι-κατανεμημένα (semi-distributed). Η υδρολογική λεκάνη διαχωρίζεται σε μεγάλα τμήματα (υπολεκάνες). • Κατανεμημένα (distributed). Η υδρολογική λεκάνη διαχωρίζεται σε μικρότερα τμήματα (διακριτοποίηση της λεκάνης σε κάρναβο - pixels).
<p>II. <i>Με βάση τη χρονική κλίμακα</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος (event). Λειτουργούν σε χρονικό επίπεδο επεισοδίου βροχής. • Συνεχή (continuous). Λειτουργούν σε συνεχή χρόνο (π.χ. ημερήσιες, ετήσιες κ.λ.π. χρονοσειρές).
<p>III. <i>Με βάση τη δομή των μεταβλητών του ομοιώματος</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Προσδιοριστικά (deterministic). Δεν υπάρχει στοχαστική δομή σε καμία μεταβλητή. • Στοχαστικά (stochastic). Μία τουλάχιστον μεταβλητή έχει στοχαστική δομή.
<p>IV. <i>Με βάση τον τρόπο προσέγγισης των φυσικών διεργασιών</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Φυσικής βάσης (physically-based). Χρησιμοποιούν απ' ευθείας τις εξισώσεις που διέπουν το φυσικό φαινόμενο. • Εννοιολογικά (conceptual). Ο υδρολογικός κύκλος αναπαρίσταται με τη βοήθεια ιδεατών στοιχείων, το κάθε ένα από τα οποία προσομοιώνει μια στοιχειώδη διαδικασία του φυσικού φαινομένου. • Εμπειρικά ή μαύρου κουτιού (empirical ή black box). Χρησιμοποιούν παραμέτρους που δεν έχουν φυσική σημασία. Οι εσωτερικές διεργασίες που διέπουν τη σχέση εισόδου (κατακρήμνιση) και εξόδου (απορροή, εξάτμιση) δεν είναι γνωστές.

1.6 Το ζήτημα των πλημμυρών

1.6.1 Γενικά για τις πλημμύρες

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK για την εκτίμηση και διαχείριση της πλημμυρικής διακινδύνευσης, πλημμύρα ορίζεται η προσωρινή κάλυψη από νερό, εδάφους το

οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό. Αυτός ο όρος περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χειμάρρους, εφήμερα ρεύματα της Μεσογείου και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, δύναται δε να εξαιρεί πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης.

Οι πλημμύρες προέρχονται από την αλληλεπίδραση φυσικών φαινομένων, των συνθηκών της λεκάνης απορροής και τη χωρητικότητα του συστήματος αποστράγγισης (φυσικού ή ανθρωπογενούς). Οι βαθύτερες αιτίες των πλημμυρών (βροχόπτωση, στάθμη της θάλασσας) είναι φυσικά φαινόμενα τα οποία δεν μπορούν κατ' ουσία να ελεγχθούν. Εντούτοις, αν μια δεδομένη βροχόπτωση θα προκαλέσει ζημίες λόγω πλημμύρας, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ανθρώπινες ενέργειες όπως η αστικοποίηση, η αποδάσωση τμημάτων της λεκάνης απορροής, η ευθυγράμμιση του ρου των ποταμών, η εξάλειψη των φυσικών πεδίων κατάκλυσης, η ανεπαρκής αποστράγγιση και η οικοδόμηση κτιρίων και κατασκευών σε επικίνδυνα πεδία κατάκλυσης (Μαμάσης, 2012).

Τα κύρια πλημμυρικά μεγέθη (παροχή αιχμής, πλημμυρικός όγκος, χρονική διάρκεια) συνδέονται με τη χωροχρονική εξέλιξη του επεισοδίου βροχής, τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου.

1.6.2 Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60/EK

Με την Οδηγία 2007/60/EK δημιουργείται το ευρωπαϊκό πλαίσιο για τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, το οποίο επεκτείνει και συντονίζεται στενά με την Οδηγία Πλαίσιο (2000/60/EK) για τα Νερά (Water Framework Directive - WFD). Η Οδηγία 2000/60 θεσπίζει το πλαίσιο της κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων και επιβάλλει την ανάπτυξη ολοκληρωμένων σχεδίων για την διαχείριση των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής κάθε ποταμού, ώστε να επιτυγχάνεται η καλή οικολογική και χημική κατάσταση, επιδιώκοντας επίσης την άμβλυνση των επιπτώσεων από τις πλημμύρες. Ωστόσο, η μείωση του κινδύνου πλημμύρας δεν είναι ένας από τους κύριους στόχους της εν λόγω οδηγίας, ούτε λαμβάνονται υπόψη μελλοντικές αλλαγές στους κινδύνους πλημμύρας, ως αποτέλεσμα της αλλαγής του κλίματος.

Η νέα Κοινοτική Οδηγία 2007/60/EK στοχεύει στη θέσπιση πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των αρνητικών συνεπειών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες που συνδέονται με τις πλημμύρες στην Κοινότητα (Άρθρο 1, 2007/60/EK). Η Οδηγία περιλαμβάνει τρία στάδια εφαρμογής:

- Διεξαγωγή προκαταρκτικής αξιολόγησης πλημμυρικής διακινδύνευσης
- Εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και πλημμυρικής διακινδύνευσης σε περιοχές που εκτίθενται σε πλημμύρες
- Κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης

1.6.3 Το πλημμυρικό καθεστώς σε Ευρώπη και Ελλάδα

Το υδρολογικό αλλά και το πλημμυρικό καθεστώς στην Ευρώπη είναι ποικίλο, λόγω της μεταβλητότητας του αναγλύφου και του κλίματος μεταξύ των περιοχών. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency), περισσότερες από 175 καταστροφικές πλημμύρες έπληξαν την Ευρώπη τα τελευταία δέκα χρόνια, αποτελώντας μέρος των συνεχώς αυξανόμενων ακραίων καιρικών φαινομένων και φυσικών καταστροφών από την δεκαετία του 1980. Παράλληλα, προβλέπεται αύξηση των πλημμύρων, των καταγίδων και άλλων ακραίων υδρο-μετεωρολογικών φαινομένων τις επόμενες δεκαετίες.

Η αύξηση του κινδύνου πλημμυρών στην Ευρώπη υποδεικνύεται, σε γενικές γραμμές από την πιθανή μελλοντική αύξηση του μεγέθους και της συχνότητας των πλημμυρών λόγω κλιματικής αλλαγής, την αλλαγή των χρήσεων γης και την αύξηση του πληθυσμού και οικονομικών αγαθών που είναι εγκατεστημένα σε ζώνες που κινδυνεύουν από πλημμύρες.

Στη χώρα μας, οι πλημμύρες των τελευταίων 40 ετών έχουν προκαλέσει πολύ περισσότερα θύματα σε ανθρώπινες ζωές από ότι οι σεισμοί στο ίδιο διάστημα. Η Ελλάδα είναι μια χώρα με πολυσχιδές ανάγλυφο και αναπτυγμένη ακτογραμμή, με αποτέλεσμα τα κλιματικά στοιχεία που σχετίζονται με τις πλημμύρες να παρουσιάζουν σημαντική γεωγραφική μεταβλητότητα. Λόγω του έντονου αναγλύφου της και των ποικίλων μεγεθών και χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής που σχηματίζονται, η χώρα έχει διαιρεθεί σε 14 υδατικά διαμερίσματα στο εσωτερικό των οποίων παρουσιάζεται σχετική ομοιογένεια, κλιματική, υδρολογική και φυσική. Η παρουσία της οροσειράς της Πίνδου που διασχίζει τη χώρα από βορειοδυτικά προς νότια επηρεάζει δραστικά τις διαδικασίες βροχοπτώσεως διαμορφώνοντας το σαφώς ιδιόμορφο υδρολογικό καθεστώς της Ελλάδας, στο οποίο τα δυτικά διαμερίσματα της χώρας δέχονται μεγαλύτερο ποσοστό βροχοπτώσεων σε σχέση με τα ανατολικά. Η μέση ετήσια βροχοπτώση ξεπερνάει τα 1800 mm στις ορεινές περιοχές της δυτικής Ελλάδας, ενώ στα ανατολικά διαμερίσματα της χώρας η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί ακόμη και στα 400 mm.

Ωστόσο, η ανομοιόμορφη κατανομή των βροχοπτώσεων δε σημαίνει ότι εξαιρετικά γεγονότα πλημμυρών είναι ιδιαίτερα σπάνια στο σχετικά ξηρό ανατολικό μέρος της Ελλάδας.

Η εκδήλωση πλημμυρικών επεισοδίων δεν σχετίζεται άμεσα με τα μέσα ετήσια ύψη βροχής, αλλά με την ένταση και τη διάρκεια των βροχοπτώσεων. Οι πλημμύρες στην Ελλάδα συχνά οφείλονται σε επεισόδια βροχόπτωσης μεγάλης έντασης (flash floods). Οι περισσότερες έντονες βροχοπτώσεις παράγονται από το πέρασμα χαμηλών βαρομετρικών, που συνήθως συνοδεύονται από ψυχρά μέτωπα (και πιο σπάνια από θερμά) και καταφθάνουν από τα δυτικά, νοτιοδυτικά ή βορειοδυτικά. Λόγω του κλιματικού καθεστώτος, σε συνδυασμό με την γεωμορφολογία και την επιφανειακή βλάστηση, παρατηρούνται περισσότερες καταστροφικές πλημμύρες στην ανατολική Ελλάδα σε σχέση με τη δυτική (Μιμίκου, 2013).

Παρόλο που οι πλημμύρες που καταγράφονται στη χώρα μας οφείλονται κατά κύριο λόγο σε φυσικά αίτια, έχουν επιδεινωθεί σημαντικά εξαιτίας των ανθρώπινων παρεμβάσεων, με κυριότερες την άναρχη οικοδόμηση και μείωση του πρασίνου. Οι δύο αυτοί παράγοντες είναι κυρίως υπεύθυνοι για την αυξανόμενη σοβαρότητα και καταστροφική δύναμη των πλημμυρικών γεγονότων στα αστικά κέντρα. Παράλληλα, η αποδάσωση και η διάβρωση του εδάφους που αυτή συνεπάγεται είναι ένα σοβαρότατο πρόβλημα στην Ελλάδα. Είναι χαρακτηριστικό ότι ενώ σύμφωνα με την Εθνική Απογραφή Δασών που υλοποιήθηκε το 1992 τα δάση και οι άλλες δασικές εκτάσεις στη χώρα μας καταλάμβαναν 6.513.068 Ha, το 49,3% δηλαδή της έκτασης της σήμερα εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύουν μόλις το 18%. Κύριος λόγος της αποδάσωσης είναι οι πυρκαγιές.

1.7 Υδρολογική συμπεριφορά δασωμένων λεκανών απορροής

Η υδρολογική και προστατευτική επίδραση της βλάστησης διαμορφώνουν τον υδρογεωνομικό ή υδρονομικό ρόλο της. Από τα διάφορα είδη βλάστησης την καλύτερη επίδραση ασκεί το δάσος (Κωτούλας, 2001). Η μείωση της βλάστησης γενικά συμβάλλει στην αύξηση της απορροής, ενώ η εγκατάστασή της στη μείωσή της, με την επίδραση αυτή να είναι μεγαλύτερη στα κωνοφόρα είδη, και εν συνεχεία στα φυλλοβόλα είδη και την ποώδη βλάστηση. Σε καλά δασωμένες λεκάνες απορροής η παροχή των ρευμάτων είναι κανονική και σχετικά σταθερή σε όλη τη διάρκεια του έτους, κατάσταση που βελτιώνεται όταν η δασική βλάστηση είναι αδιατάρακτη.

Η βλάστηση ασκεί σοβαρή υδρολογική επίδραση, ιδίως στη δίαιτα των χειμαρρικών ρευμάτων, παράλληλα δε προσφέρει και πολύ καλή προστασία στο γεωυπόθεμα. Η δασική βλάστηση μιας λεκάνης απορροής συμβάλλει τόσο στη συγκράτηση και αποθήκευση σημαντικού ποσοστού της βροχής, όσο και στην προστασία του εδάφους από τη διάβρωση. Κατά συνέπεια, ο κίνδυνος πλημμύρας εξαλείφεται ή περιορίζεται σημαντικά.

Η επίδραση της βλάστησης στις πλημμύρες σήμερα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την αριθμητική έκφραση των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια μιας βροχής. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν την υδατοσυγκράτηση από τη δασική βλάστηση, τη φυλλάδα και το χούμο, την εξατμισοδιαπνοή, τη διήθηση της βροχής στο έδαφος από τη δράση των ριζών και των φυλλωμάτων που πέφτουν, τη δημιουργία επιφανειακής και υπεδάφιας απορροής, τη μόνιμη και παροδική συγκράτηση ενός μέρους της βροχής από το έδαφος υπό μορφή υγρασίας, καθώς και τη διάβρωση του εδάφους. Οι τιμές παρουσιάζουν ένα εύρος από περιοχή σε περιοχή, που εξαρτάται από το δασικό είδος, τον τύπο του εδάφους, την τοπογραφία και γεωμορφολογία της λεκάνης, τα χαρακτηριστικά των κατακρημνισμάτων κ.λ.π. (Μπαλούτσος κ.ά., 2001).

Ανακεφαλαιωτικά, η φυτοκάλυψη δρα προς την κατεύθυνση της μείωσης του όγκου άμεσης απορροής, και της επιβράδυνσης και εξομάλυνσης των ρυθμών της, με τελική συνέπεια τη μείωση των αιχμών των πλημμυρικών υδρογραφημάτων. Για τους ίδιους λόγους, όταν καταστρέφεται η χλωρίδα, π.χ. από πυρκαγιές ή εκχέρσωση, αλλάζει η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης και συγκεκριμένα επιταχύνονται και ισχυροποιούνται τα φαινόμενα των πλημμυρών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

1.8 Πυρκαγιές

1.8.1 Χαρακτηριστικά των δασικών πυρκαγιών

Οι δασικές πυρκαγιές ανάλογα με τον τρόπο εξάπλωσής τους διακρίνονται σε (ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε, 2007):

- Πυρκαγιές εδάφους ή υπόγειες. Είναι σπάνιες πυρκαγιές στη χώρα μας. Καίνε κατά κανόνα την καύσιμη ύλη που συσσωρεύεται στο έδαφος ή κάτω από αυτό. Τροφοδοτούνται με ελάχιστο οξυγόνο, βγάζουν λίγο ή καθόλου καπνό και εξαπλώνονται με πολύ αργό ρυθμό.
- Πυρκαγιές επιφανείας ή έρπουσες. Οι πυρκαγιές αυτές είναι οι πιο συνηθισμένες στη χώρα μας. Καίνε τη νεκρή καύσιμη ύλη που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος ή τη ζωντανή βλάστηση που αναπτύσσεται πάνω από αυτό. Σε αυτές είτε δεν υπάρχουν κόμες υψηλών δένδρων επάνω από την παρεδάφια βλάστηση είτε υπάρχουν κόμες δένδρων που όμως λόγω των συνθηκών δεν αναφλέγονται. Τα χαρακτηριστικά των πυρκαγιών αυτών διαφέρουν σημαντικά κατά περίπτωση.

- Πυρκαγιές κόμης ή επικόρυφες. Οι πυρκαγιές αυτές συμβαίνουν σε υψηλά δάση όπου γίνεται ανάφλεξη και καύση της κόμης των δένδρων. Είναι πάντοτε σοβαρές πυρκαγιές, δύσκολες και επικίνδυνες στην αντιμετώπισή τους, με μεγάλες φλόγες και κατά κανόνα γρήγορη εξάπλωση.

Σπάνια, αλλά ιδιαίτερου κινδύνου πυρκαγιά κόμης, είναι εκείνη κατά την οποία σε δάση με πυκνή και συνεχή κόμη δένδρων και με ισχυρό άνεμο η φωτιά εξαπλώνεται με μεγάλη ταχύτητα από κόμη σε κόμη κινούμενη ανεξάρτητα και ταχύτερα από την πυρκαγιά του υπορόφου. Μια τέτοια πυρκαγιά περιγράφεται σαν ανεξάρτητη πυρκαγιά κόμης.

Η φωτιά είναι αποτέλεσμα μιας χημικής διεργασίας για την οποία απαιτείται η συνύπαρξη τριών θεμελιωδών στοιχείων κατάλληλα συνδεδεμένων μεταξύ τους:

- Καύσιμη ύλη
- Οξυγόνο
- Θερμότητα

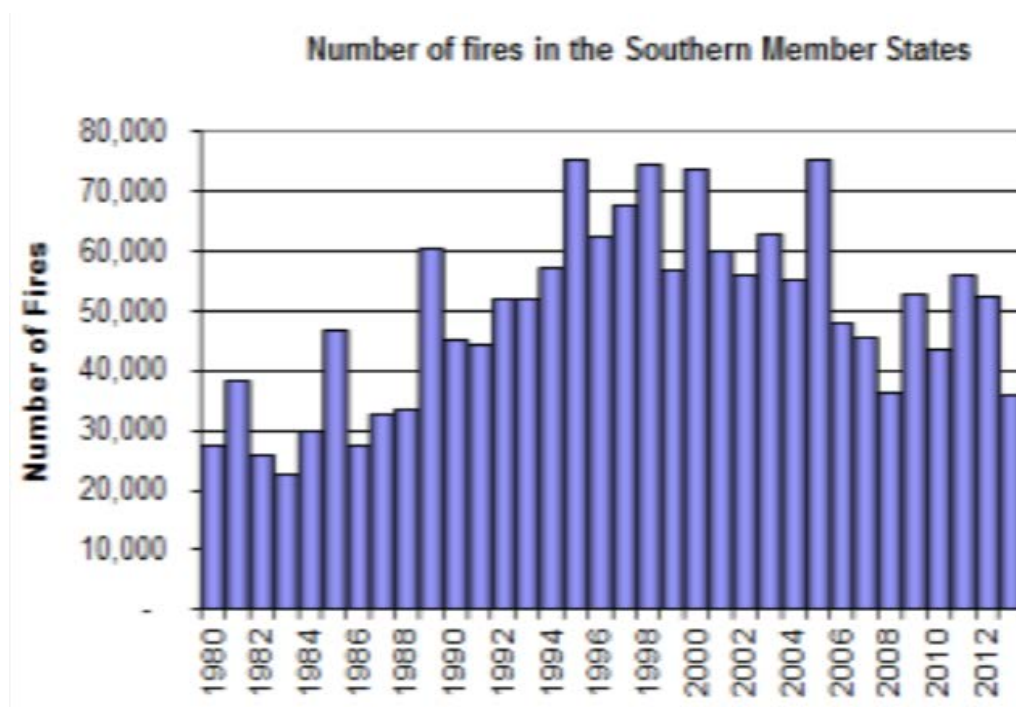
Τα τρία αυτά στοιχεία αποτελούν το λεγόμενο "τρίγωνο της φωτιάς". Εάν ένα από αυτά λείπει τότε δεν εκδηλώνεται πυρκαγιά και κατά συνέπεια, με τον κατάλληλο έλεγχο ενός από τους τρεις παράγοντες, επιτυγχάνεται η πρόληψη και η κατάσβεση.

Ωστόσο, η συμπεριφορά της πυρκαγιάς και ο τρόπος εξάπλωσής της είναι εξαρτάται από ορισμένους παράγοντες που εμπίπτουν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης
- Καιρικές συνθήκες
- Τοπογραφικές συνθήκες

1.8.2 Οι πυρκαγιές σε Μεσόγειο και Ελλάδα

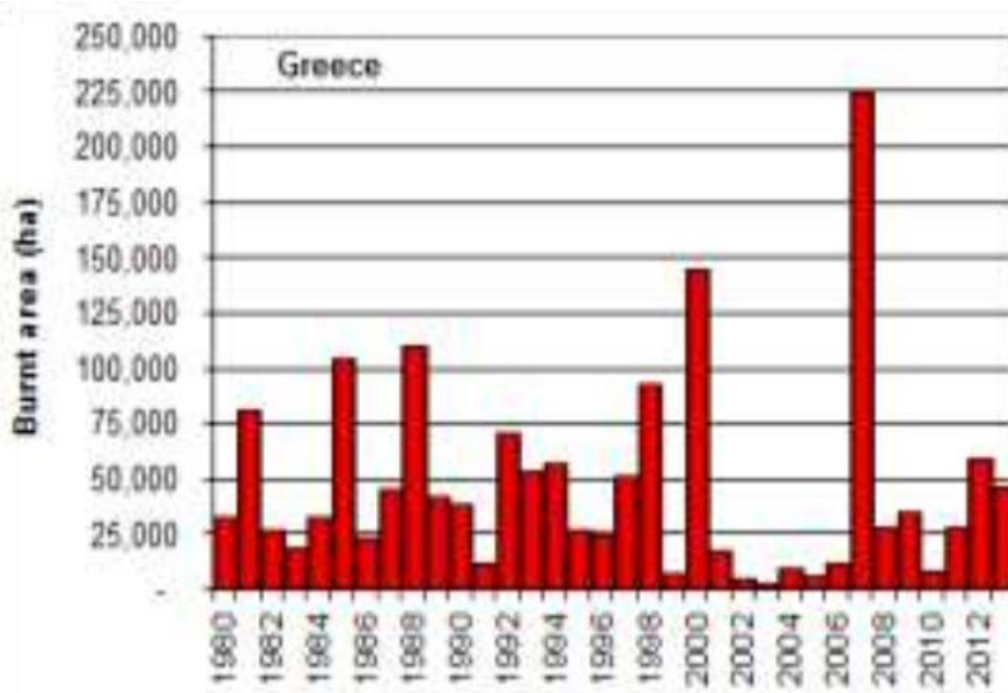
Το κλίμα και η βλάστηση των μεσογειακών περιοχών δημιουργούν τις κατάλληλες συνθήκες για την εκδήλωση σφοδρών πυρκαγιών, που αποτελούν αναπόσπαστη διαταραχή στα μεσογειακά οικοσυστήματα. Η συνολική έκταση που επηρεάζεται από τις φωτιές στις ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου (Πορτογαλία, Ισπανία, Γαλλία, Ιταλία, Ελλάδα), μεταβάλλεται αξιοσημείωτα από χρονιά σε χρονιά, λόγω των διαφορετικών μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν. Ωστόσο, ο αριθμός των πυρκαγιών παρουσιάζει μια αυξητική τάση από το 1990 (Διάγραμμα 1.1).



Διάγραμμα 1.1: Αριθμός πυρκαγιών στις 5 ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου από το 1980 έως το 2013 (Πηγή: European Commission JRC, 2014)

Η Ελλάδα από άποψη φυσικών συνθηκών (κλίμα, έδαφος κλπ) βρίσκεται ολόκληρη στη ζώνη της φυσικής εξάπλωσης των δασών, εκτός από τις πολύ υψηλές κορυφές (άνω των 2000 m), όπου το κλίμα δεν επιτρέπει την ανάπτυξη των δένδρων (Ντάφης, 1986). Συγκεντρώνει αξιόλογο δασικό πλούτο και διαθέτει ένα από τα υψηλότερα επίπεδα βιοποικιλότητας στη Μεσόγειο και την Ευρώπη.

Ωστόσο, οι δασικές πυρκαγιές ανέκαθεν αποτελούν μία από τις σημαντικότερες φυσικές καταστροφές σε ένα κατεξοχήν πυριγενές φυσικό περιβάλλον, από άποψη κλίματος και βλάστησης. Τεράστιες εκτάσεις καίγονται κάθε χρόνο (Διάγραμμα 1.2) κυρίως κατά τη θερινή περίοδο, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τις πυρκαγιές του Αυγούστου του 2007 να αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες φυσικές καταστροφές στην ιστορία της σύγχρονης Ελλάδας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι από τις πυρκαγιές που έπληξαν τη χώρα μας το έτος 2013, το 90% των εκτάσεων κάηκε κατά τους μήνες Ιούλιο-Αύγουστο και το 64,22% εξ' αυτών ήταν δασικές (European Commission JRC, 2014).



Διάγραμμα 1.2: Σύνολο καμένης έκτασης (ha) στην Ελλάδα από το 1980 έως το 2013
(Πηγή: European Commission JRC, 2014)

Επιπρόσθετα, στη χώρα μας, εξαιτίας των απότομων κλίσεων των δασικών εκτάσεων, του κλίματος με τη μεγάλη ξηροθερμική περίοδο, τις καταρρακτώδεις βροχές και του μικρού βάθους του εδάφους, υπάρχει πάντοτε κίνδυνος διάβρωσης του εδάφους, απωλειών νερού και πλημμυρών λόγω αυξημένων επιφανειακών απορροών, φαινόμενα που οξύνονται υπέρμετρα μετά από μια πυρκαγιά.

1.8.3 Επίδραση πυρκαγιών στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής

Η πυρκαγιά μπορεί να είναι καθοριστικός παράγοντας για την μετέπειτα (μεταπυρική) κατάσταση της λεκάνης απορροής. Ο ρόλος που θα παίξει η φωτιά εξαρτάται κυρίως από την δριμύτητά της (ένταση και διάρκεια) (De Bano et al, 1998). Οι αλλαγές στο υδρολογικό καθεστώς λεκανών απορροής είναι μεγαλύτερες τον πρώτο χρόνο μετά τη φωτιά και μειώνονται από το δεύτερο χρόνο και μετά (De Bano, 2000, Scott, 1993).

Στη συνέχεια αναφέρονται, με τη σειρά εμφάνισής τους, οι κυριότερες μεταβολές και διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής μετά από πυρκαγιά και συμβάλλουν στην εκδήλωση πλημμύρας:

- Καταστροφή της βλάστησης.
- Μεταβολή των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους και συνεπώς της παραγωγικότητάς του.
- Σχηματισμός υδρόφοβου στρώματος (βάθους 5-10 cm) εντός του εδάφους από καύση οργανικής ουσίας και διείδυση χημικών ενώσεων σε αυτό (Εικόνα 1.1), με αποτέλεσμα τη μείωση της περατότητας του εδάφους.
- Αύξηση ύψους βροχής λόγω έλλειψης βλάστησης και υδατοσυγκράτησης.
- Συγκράτηση λιγότερης βροχής στην επιφάνεια του εδάφους λόγω καύσης των επιφανειακών φυτικών υπολειμμάτων (φυλλάδας, χούμου κ.λ.π.).
- Μείωση της εξατμισοδιαπνοής λόγω απουσίας της φυτοκάλυψης.
- Κατακερματισμός των εδαφικών συσσωμάτων από τη βροχή, απόφραξη των πόρων του εδάφους και μείωση της ταχύτητας διήθησης της βροχής σ' αυτό.
- Μείωση της ταχύτητας διήθησης της βροχής στο έδαφος και λόγω απόφραξης των πόρων του από τα υπολείμματα της καύσης.
- Μείωση τροφοδοσίας υπογείων υδροφορέων - μείωση παροχευτικότητας γεωτρήσεων.
- Αύξηση συντελεστή επιφανειακής απορροής κατά τη διάρκεια των πλημμυρών με σημαντική αύξηση του πλημμυρικού όγκου.
- Μείωση της αντίστασης του εδάφους στην παράσυρση από επιφανειακή απορροή, λόγω έλλειψης βλάστησης.
- Διάβρωση και παράσυρση του εδάφους από τις πλαγιές της λεκάνης προς τα κατάντη και τις κοίτες των υδατορευμάτων.
- Σημαντική και απότομη αύξηση της υδατοστερεοπαροχής στην κοίτη των υδατορευμάτων σε περίπτωση βροχής.
- Διάβρωση του πυθμένα και των πρανών της κοίτης των υδατορευμάτων και μεταφορά των υλικών διάβρωσης προς τα κατάντη.
- Μπάζωμα των ρεμάτων και μείωση της ανασχετικής τους ικανότητας.
- Εκδήλωση χειμαρρικών φαινομένων στην πεδινή και κατοικημένη περιοχή της λεκάνης με πληθώρα δυσμενών επιπτώσεων.
- Υπερχείλιση της πεδινής κοίτης του υδατορεύματος και επιδείνωση της κατάστασης σε περίπτωση ύπαρξης ανθρώπινων επεμβάσεων.



Εικόνα 1.1: Σχηματισμός υδρόφοβου στρώματος μετά από πυρκαγιά σε δάσος ευκαλύπτου της Αυστραλίας (Πηγή: Rob Ferguson)

Αναλυτικότερα, όσον αφορά την επίδραση των πυρκαγιών στην πλημμυρική απορροή, οι Lavabre et al (1993), μελέτησαν σε διάφορες χρονικές στιγμές την υδρολογική συμπεριφορά πειραματικής λεκάνης της Μεσογείου, έκτασης $1,45 \text{ km}^2$, η οποία καλύπτεται από πευκο-δρύνιο δάσος και η πυρκαγιά έκαψε το 85% αυτής. Κατέληξαν σε αύξηση 30% στην ετήσια απορροή για ίδιες τιμές ετήσιας βροχόπτωσης, ενώ οι μηνιαίες και ημερήσιες αυξήθηκαν κατά 25%. Τα αποτελέσματα συνδέθηκαν με τη μείωση της εξατμισοδιαπνοής λόγω απώλειας της φυτικής κάλυψης. Η δυνατότητα κατακράτησης νερού από το έδαφος είχε ουσιαστικά χαθεί, ενώ παρατηρήθηκαν μεγάλες αλλαγές στο σχήμα των υδρογραφημάτων (τα 10 υδρογραφήματα μετά τη φωτιά ήταν πιο απότομα), καθώς και εξαιρετικά μεγάλη αύξηση στη συχνότητα εμφάνισης πλημμύρας. Συγκεκριμένα, η πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς 10 ετών - η οποία εκτιμήθηκε σε συνθήκες πριν την πυρκαγιά - εμφανίστηκε τρεις φορές μέσα στον πρώτο χρόνο που ακολούθησε τη φωτιά, παρόλο που τα γεγονότα βροχόπτωσης δεν ξεπερνούσαν σε διάρκεια τις 12 ώρες και την περίοδο επαναφοράς του ενός έτους.

Όπως αναφέρει η βιβλιογραφική έρευνα που έχει πραγματοποιήσει ο Batalla (2001), οι αυξήσεις στην επιφανειακή απορροή σε περιοχές με μεσογειακού τύπου οικοσυστήματα (Καλιφόρνια, Ισραήλ και Ιβηρική Χερσόνησος), κυμαίνονται από 11% (Anderson et al., 1976) έως 300% (Nasser, 1988) σε μεγάλες λεκάνες απορροής, μέχρι 800% σε μικρές (Campbell et al., 1977) και μέχρι 50000% σε πειραματικές επιφάνειες (Inbar et al., 1998). Οι αυξήσεις στις πλημμυρικές αιχμές κυμαίνονται από 45% (Anderson et al., 1976) ως 600%

(Nasserí, 1988) σε μεγάλες λεκάνες και μέχρι 5700% (Campbell et al., 1977) σε μικρές λεκάνες. Επίσης, αναφέρεται η εμφάνιση, στο πλημμυρογράφημα, δευτερευουσών απότομων αιχμών που αντικαθιστούν τον ομαλό κατερχόμενο κλάδο, όπως καταγραφόταν πριν την εκδήλωση της πυρκαγιάς (Brown, 1972).

Οι Lopez και Batalla (2001) παρατήρησαν αύξηση κατά 30% της πλημμυρικής απορροής και 120% των παροχών αιχμής για τα ίδια δεδομένα βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια γεγονότων έξι μήνες μετά τη φωτιά του 1994 στη λεκάνη του Arbuçies, βορειοανατολικά της Ισπανίας. Ενώ οι Scott και Van Wyk (1990) αναφέρουν 200% αύξηση στην ετήσια απορροή και έως 300% αύξηση στην παροχή αιχμής κατά τη διάρκεια του έτους που ακολούθησε τις πυρκαγιές, σε λεκάνη της Ν. Αφρικής.

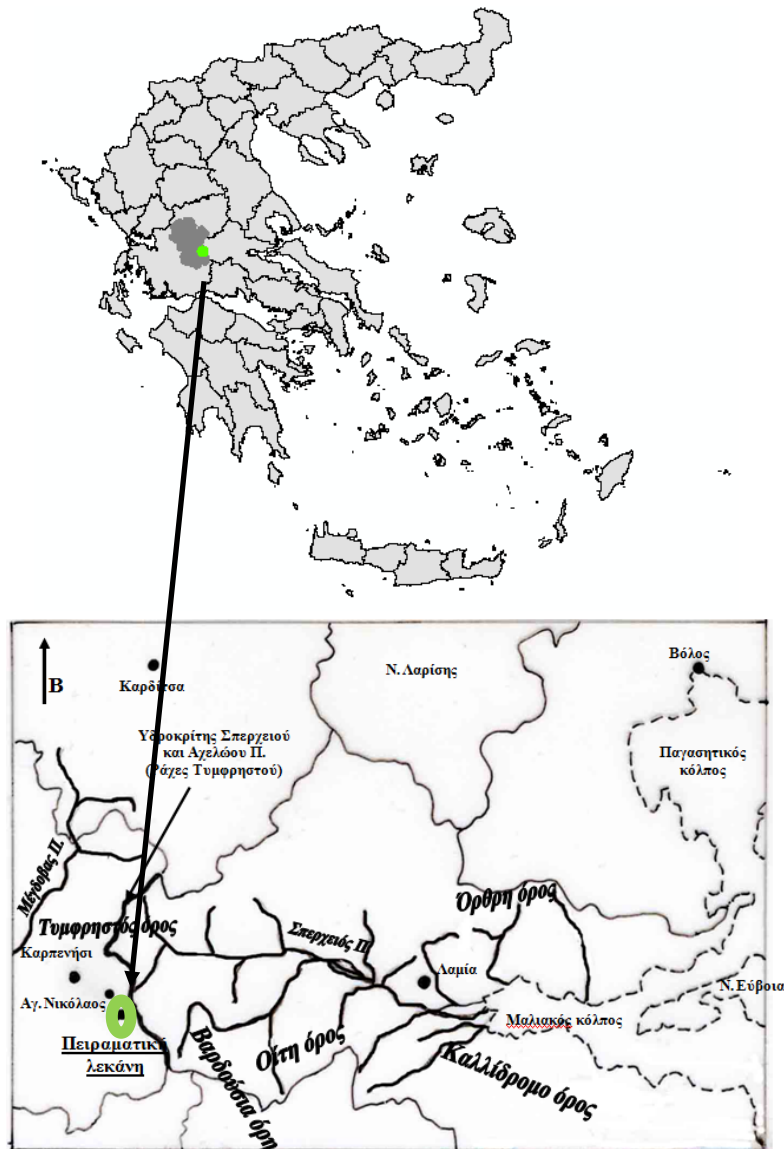
Υπάρχουν και έρευνες που υποστηρίζουν ότι τα εδαφικά χαρακτηριστικά σπάνια επηρεάζονται από πυρκαγιές που χαρακτηρίζονται μικρής έως μέτριας έντασης (Hudson et al., 1983). Σ' αυτές τις περιπτώσεις, ο χρόνος που χρειάζεται για να επανέλθει η επιφανειακή απορροή στα επίπεδα που ίσχυαν πριν την εμφάνιση της φωτιάς εξαρτάται απόλυτα από το χρόνο ανάκαμψης της φυτικής κάλυψης.

Συμπερασματικά, η αποκατάσταση του φυσικού φυτομανδύα που έχει καταστραφεί, ιδιαίτερα στον ορεινό χώρο, αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση και πρόδρομη πράξη, για την αποτροπή της συνεχούς υποβάθμισης του εδάφους των λεκανών απορροής, τη μείωση της ποσότητας και ταχύτητας των υδάτων που απορρέουν επιφανειακά, τον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων και την εξασφάλιση της αένιας διαίτας των πηγών (Μάρης, 2013).

2. Περιοχή μελέτης

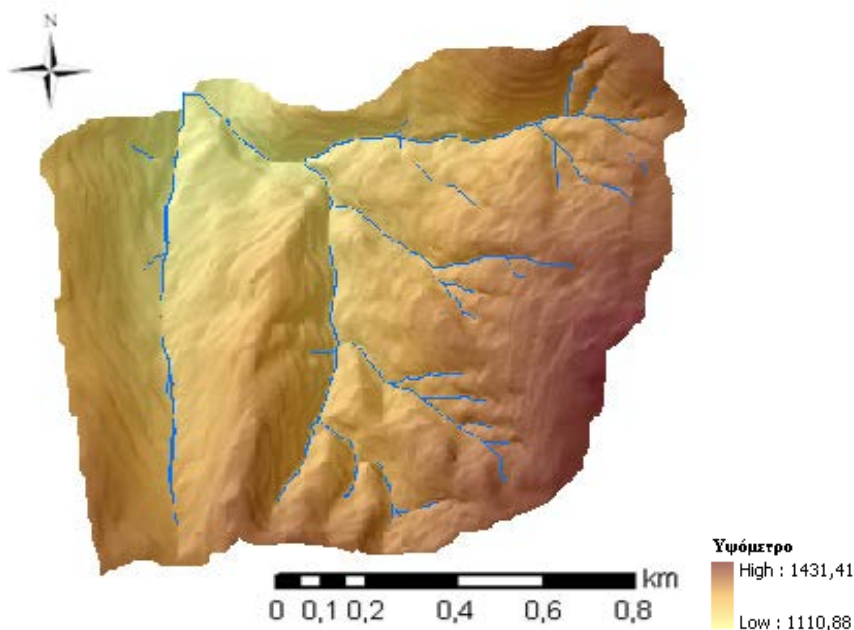
2.1 Περιγραφή της λεκάνης μελέτης

Η υπό μελέτη υδρολογική λεκάνη αποτελεί τμήμα του ελατοδάσους "Αγίου Νικολάου", το οποίο υπάγεται διοικητικά στον Δήμο Καρπενησίου και στο Δημοτικό Διαμέρισμα Αγίου Νικολάου του Νομού Ευρυτανίας. Ειδικότερα, βρίσκεται στις Ράχες Τυμφρηστού, σε απόσταση 3 km περίπου από το χωριό Άγιος Νικόλαος, συνορεύοντας ανατολικά με τα διοικητικά όρια του Νομού Φθιώτιδας (Εικόνα 2.1).

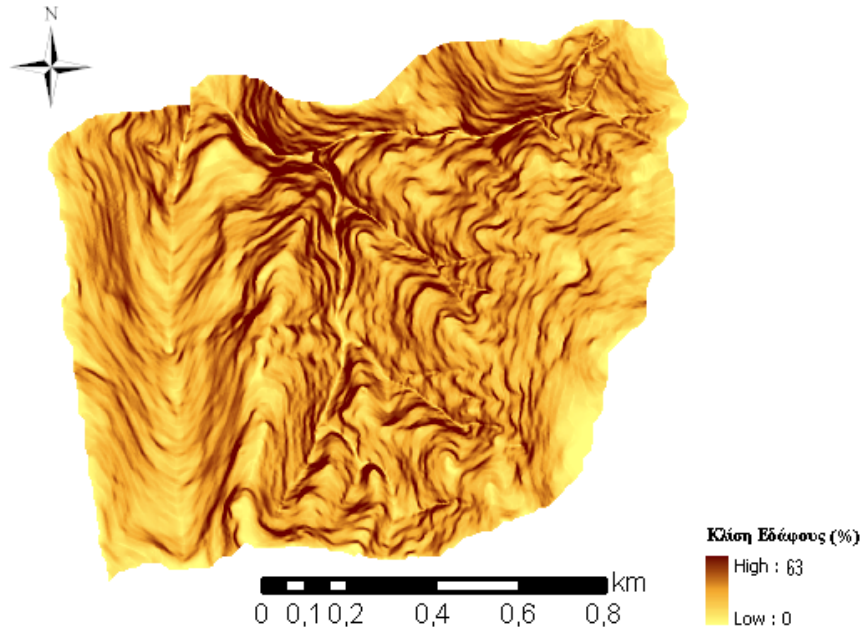


Εικόνα 2.1: Γεωγραφική θέση της λεκάνης απορροής
(Πηγή: Μπαλούτσος κ.ά., 2005)

Πρόκειται για πειραματική λεκάνη του Ινστιτούτου Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ & ΤΔΠ) του πρώην Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ), η οποία επιλέχθηκε από τη Δασική Υπηρεσία δια του Ινστιτούτου Δασικών Ερευνών Αθηνών και του FAO (Καραμήτρος, 1974) για υδρολογικούς σκοπούς. Καταλαμβάνει έκταση 1,45 km². Διασχίζεται από τα χειμαρρώδη ρεύματα Κρύα Βρύση, Καρανάσιου και Αλαφάκι που συμβάλλουν στον ποταμό Βρούσο, ο οποίος ενώνεται με τον ποταμό Καρπενησιώτη. Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης είναι 1287 m, με μέγιστο υψόμετρο 1431 m και ελάχιστο 1111 m (Εικόνα 2.2). Η κλίση του εδάφους κυμαίνεται από 0% έως 63% με μέση κλίση 22% (Εικόνα 2.3), ενώ απαντώνται όλες οι εκθέσεις σε σχέση με τα σημεία του ορίζοντα. Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η συγκεκριμένη λεκάνη, λόγω του έντονου ενδιαφέροντος που παρουσιάζει η υδρολογική ανάλυση μιας μικρής, ορεινής δασωμένης λεκάνης απορροής.



Εικόνα 2.2: Απόδοση αναγλύφου λεκάνης απορροής



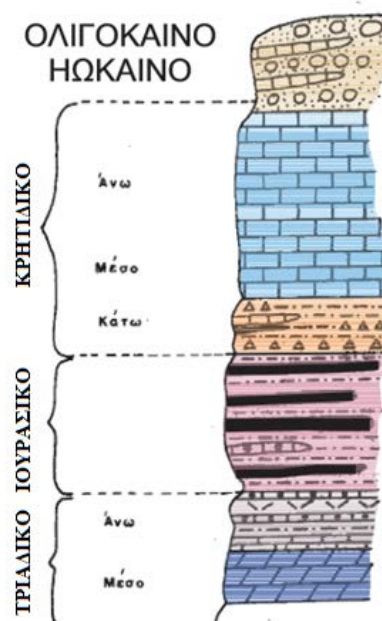
Εικόνα 2.3: Κλίσεις εδάφους λεκάνης απορροής

2.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Ο ορεινός όγκος του δάσους Αγίου Νικολάου είναι συνέχεια της οροσειράς της Πίνδου. Ανήκει στη γεωτεκτονική ζώνη Ωλονού-Πίνδου που διαμορφώθηκε κατά την περίοδο του Τριαδικού. Ο γεωλογικός σχηματισμός που απαντά στην εξεταζόμενη περιοχή είναι ο φλύσχος Ωλονού Πίνδου. Λιθολογικά αρχίζει από την ανωτάτη βαθμίδα του Κρητιδικού και φτάνει μέχρι του Ολιγοκαίνου.

Η ιζαματογένεση χαρακτηρίζεται από τις φάσεις της βαθιάς θάλασσας (λεπτομερή ασβεστολιθικά, πυριτιούχα και αργιλικά αποθέματα). Στους παλαιούς σχηματισμούς επικρατούν οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι ερυθρών ή μαύρων πυριτιλίθων και ερυθρών σχιστόλιθων του Άνω Τριαδικού. Στους Ιουρασικούς σχηματισμούς επικρατούν τα πυριτιούχα ιζήματα. Το δε Κρητιδικό παρουσιάζει σημαντική εξάπλωση με φάσεις κυρίως ασβεστολιθικές και πλευρικές ενδοφασικές μεταβολές. Η τεκτογένεση της ζώνης άρχισε στο Άνω Ηώκαινο και εξακολούθησε ως το τέλος του Ολιγοκαίνου. Αποτέλεσμα της γεωλογικής ιστορίας είναι τα επικρατούντα πετρώματα ασβεστόλιθων-σχιστόλιθων και ο επικαθίμενος σ' αυτά φλύσχος (Δασαρχείο Καρπενησίου, 2008).

Στην υπό μελέτη λεκάνη, το έδαφος προέρχεται από αποσάθρωση ψαμμιτικού φλύσχη. Είναι αμμοπηλώδες-αμμοαργιλώδες, πηλώδους υφής, όξινο και βαθύ. Κατατάσσεται ως Humic Alisols (FAO, 1988).



Εικόνα 2.4: Στρωματογραφική στήλη γεωλογικής δομής

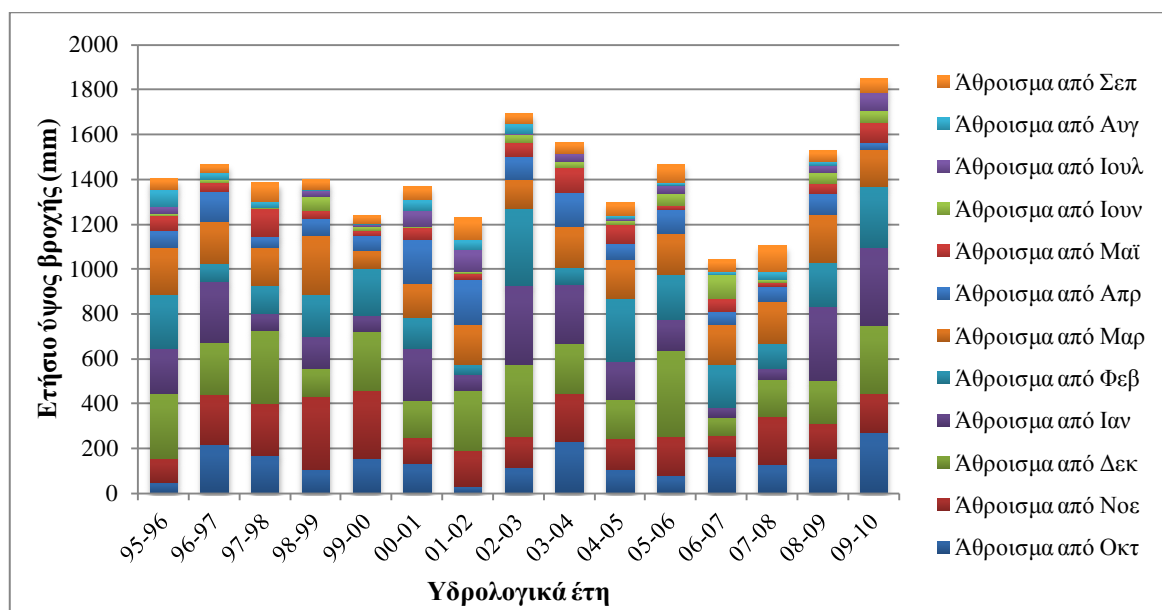
Το έδαφος είναι ένας από τους σπουδαιότερους παράγοντες για την ανάπτυξη των δέντρων και γενικότερα των φυτών. Εξετάζοντάς το ως συντελεστή παραγωγής, διατηρεί στο μέγιστο τις παραγωγικές του δυνατότητες και η αξία του, υπολογιζόμενη ως αξία εδαφικής προσόδου, είναι πολύ σημαντική.

2.3 Κλιματικές συνθήκες

Το κλίμα της περιοχής ποικίλλει καθώς οι βροχές και οι θερμοκρασίες, κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, παρουσιάζουν πολλές ιδιαιτερότητες. Τα μετεωρολογικά στοιχεία που παρατίθενται στη συνέχεια, αναφέρονται στα έτη 1995-2010 και ελήφθησαν από το ΙΜΔΟ&ΤΔΠ - Τομέας Υδρολογίας. Η βροχή αποτελεί την κύρια μορφή κατακρημνισμάτων της περιοχής. Το ποσοστό του χιονιού κυμαίνεται από 8% - 10% του ετησίου ύψους των συνολικών κατακρημνισμάτων, ενώ οι επικρατούσες καιρικές συνθήκες συμβάλλουν στη δημιουργία ομιχλοβροχής, με ποσοστό που κυμαίνεται ετησίως από 7,5% έως και 20,6% (Μπαλούτσος κ.ά., 2005).

Πίνακας 2.1: Μηνιαία βροχόπτωση (mm) υδρολογικών ετών 1995-2010

ΥΔΡ. ΕΤΟΣ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	ΣΥΝΟΛΟ
95-96	48	106	292	200	240	209	77	64	10	34	76	47	1403
96-97	217	222	235	268	80	188	133	40	15	0	30	36	1464
97-98	170	228	329	72	128	170	47	126	3	0	29	84	1384
98-99	108	325	121	146	186	265	72	39	62	27	4	42	1397
99-00	156	300	263	72	211	78	67	23	18	12	3	37	1240
00-01	131	119	164	233	137	153	194	53	5	72	48	58	1366
01-02	32	157	270	69	44	181	201	26	8	97	45	97	1228
02-03	113	140	319	355	344	129	100	62	35	7	43	46	1694
03-04	229	217	221	265	73	183	151	111	27	39	0	48	1563
04-05	104	140	175	169	279	175	71	85	18	7	15	59	1297
05-06	77	177	383	139	199	183	106	19	55	36	9	82	1466
06-07	162	95	82	45	189	179	56	59	106	1	13	55	1041
07-08	126	217	163	49	112	187	68	18	11	3	35	117	1105
08-09	153	160	190	330	196	213	92	48	47	32	19	47	1528
09-10	270	174	302	350	271	164	34	87	52	81	0	64	1847
M.O.	140	185	234	184	179	177	98	57	31	30	25	61	1401



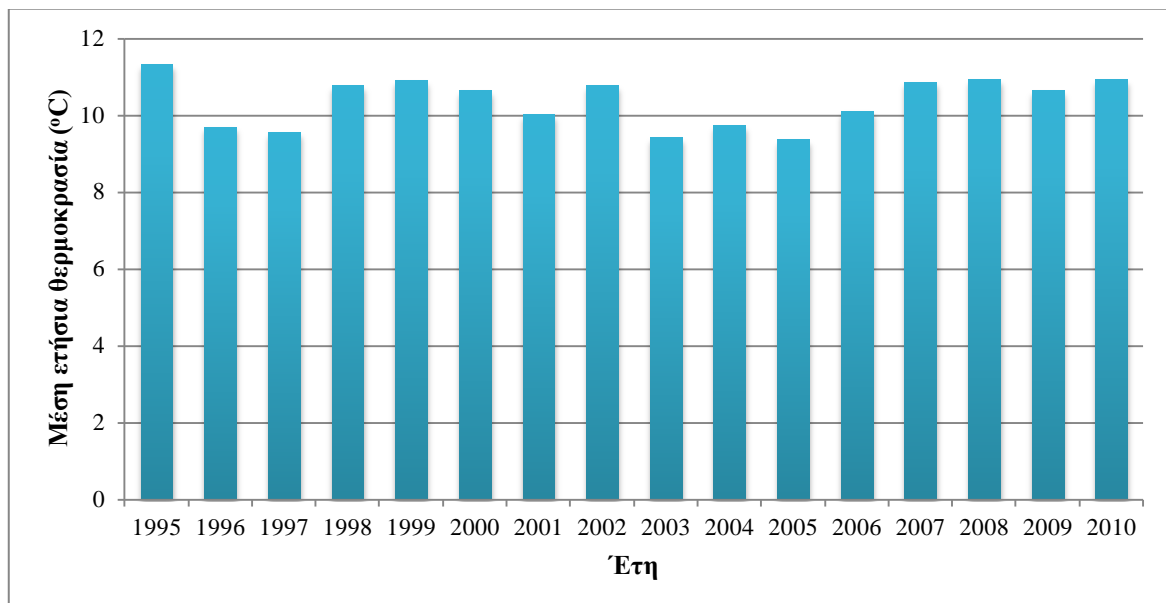
Διάγραμμα 2.1: Ετήσια βροχόπτωση υδρολογικών ετών 1995-2010

Από τον Πίνακα 2.1 και το Διάγραμμα 2.1 διαπιστώνεται ανισοκατανομή των βροχοπτώσεων μεταξύ των υδρολογικών ετών. Το υδρολογικό έτος 2006-07 σημειώνεται η χαμηλότερη τιμή της δεκαπενταετίας με συνολική ετήσια βροχόπτωση 1041 mm, ενώ το υδρολογικό έτος 2009-10 είναι το πιο υγρό με ετήσιο ύψος βροχής 1847 mm. Κατά τη διετία 2006-2008 παρατηρείται σαφής μείωση των βροχοπτώσεων στην περιοχή. Ωστόσο, στα

επόμενα έτη, οι τιμές της ετήσιας βροχόπτωσης αυξάνονται σημαντικά. Επίσης, οι υψηλότερες τιμές στα ύψη βροχής καταγράφονται τους μήνες Νοέμβριο έως Μάρτιο.

Πίνακας 2.2: Μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας (°C) περιόδου 1995-2010

ΕΤΟΣ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Μ.Ο.
1995	3.1	6.6	4.4	8.5	13.7	19.5	20.8	19.7	17.1	11.1	5.8	5.5	11.3
1996	1.8	2.5	1.9	6.1	14.1	17.1	19.8	19.2	13.6	8.3	8.0	3.7	9.7
1997	3.4	2.4	2.1	3.6	14.5	18.9	20.7	17.4	14.3	9.0	6.2	2.0	9.5
1998	2.7	4.0	1.0	9.6	11.4	19.0	22.6	22.3	15.5	12.9	7.2	0.9	10.8
1999	3.1	1.0	4.3	8.3	13.5	18.7	19.5	22.4	16.7	12.8	6.0	4.3	10.9
2000	-1.9	1.3	9.7	13.9	18.3	22.6	21.8	16.0	10.3	10.0	3.8	1.7	10.6
2001	1.7	2.4	8.9	7.1	13.0	17.4	20.6	19.4	15.5	11.7	4.6	-2.2	10.0
2002	0.5	5.8	7.1	8.0	13.5	19.0	21.4	18.4	14.3	11.6	8.0	1.6	10.8
2003	2.8	-4.1	1.0	5.2	14.7	18.7	21.0	20.6	14.6	11.8	6.3	0.3	9.4
2004	-1.7	1.8	3.5	8.0	11.1	17.3	19.3	20.1	15.3	13.2	5.6	3.3	9.7
2005	0.5	-1.6	4.4	6.8	12.3	15.9	20.2	19.6	15.9	10.3	5.5	2.4	9.4
2006	-1.4	1.1	4.6	9.6	14.0	17.4	20.0	21.7	15.3	11.2	5.4	2.4	10.1
2007	3.9	2.3	4.3	8.3	14.4	18.9	22.0	21.9	15.8	11.3	5.9	1.2	10.9
2008	1.9	2.0	6.5	10.0	13.9	18.8	21.3	21.8	15.2	10.9	6.7	1.9	10.9
2009	1.4	-0.4	3.5	7.7	14.6	17.9	21.1	20.7	15.5	11.5	8.6	5.5	10.6
2010	1.3	3.2	5.1	9.0	14.1	16.9	19.4	22.2	15.6	9.4	10.4	4.5	10.9
Μ.Ο.	1.4	1.9	4.5	8.1	13.8	18.4	20.7	20.2	15.0	11.1	6.5	2.4	10.3

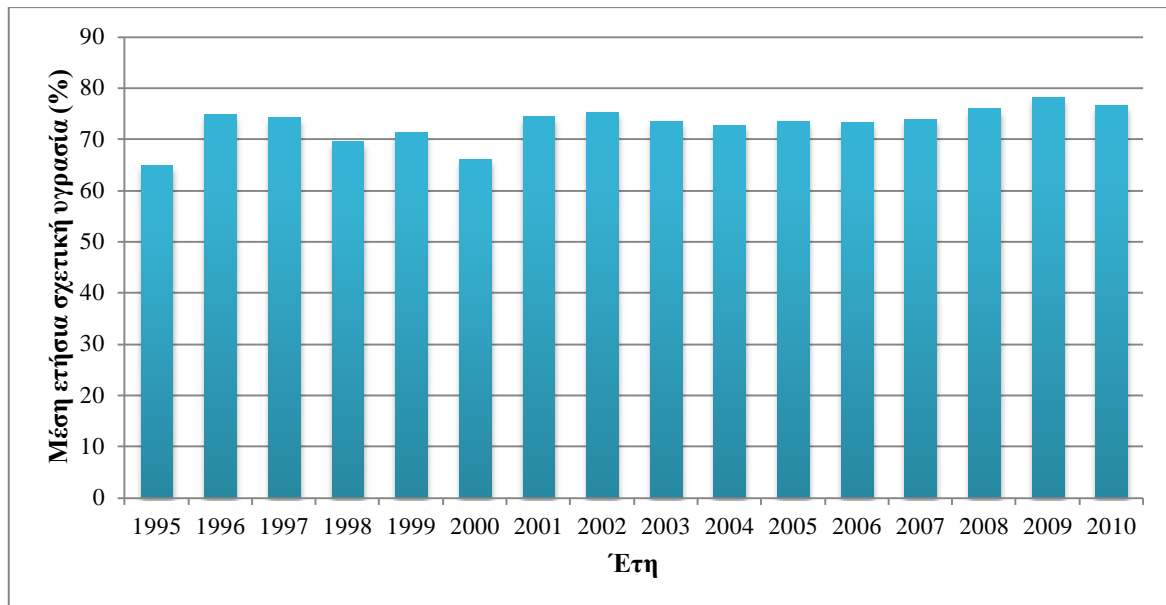


Διάγραμμα 2.2: Μέση ετήσια θερμοκρασία περιόδου 1995-2010

Όσον αφορά τη μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες διακυμάνσεις, με εξαίρεση την πτώση που σημειώθηκε τα έτη 1996-1997 και 2003-2005.

Πίνακας 2.3: Μέσες μηνιαίες τιμές σχετικής υγρασίας (%) περιόδου 1995-2010

ΕΤΟΣ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Μ.Ο.
1995	82	64	75	65	53	42	52	58	61	70	68	88	64.8
1996	93	86	88	77	68	55	56	63	68	82	73	87	74.7
1997	78	72	79	74	64	62	55	70	77	84	88	88	74.1
1998	84	80	81	70	77	56	40	43	58	73	78	95	69.4
1999	92	88	79	61	66	61	68	52	69	61	78	79	71.2
2000	79	84	66	70	61	54	43	46	63	79	69	79	66.0
2001	88	78	70	79	70	61	61	67	70	72	83	92	74.3
2002	81	77	79	84	76	62	64	68	77	71	76	87	75.2
2003	82	85	76	76	67	65	56	61	71	74	83	85	73.4
2004	82	74	81	73	72	65	61	60	70	75	76	84	72.7
2005	80	85	75	68	70	66	62	64	73	79	79	79	73.4
2006	88	81	79	74	64	63	66	56	70	80	73	83	73.2
2007	71	85	84	75	73	63	52	58	69	82	85	89	73.9
2008	82	84	81	71	69	67	61	58	76	84	90	87	75.8
2009	96	88	79	81	72	69	64	66	80	81	76	87	78.1
2010	88	85	76	74	66	73	72	58	76	93	77	80	76.4
Μ.Ο.	84.1	80.9	78.0	73.3	68.0	61.4	58.2	59.3	70.6	77.4	78.2	85.6	72.7



Διάγραμμα 2.3: Μέση ετήσια σχετική υγρασία περιόδου 1995-2010

Από τα παραπάνω στοιχεία εξάγεται το συμπέρασμα ότι η περιοχή χαρακτηρίζεται από υψηλή σχετική υγρασία, χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια των ετών, με τις μικρότερες τιμές μέσης ετήσιας υγρασίας να καταγράφονται τα έτη 1995 και 2000.

2.4 Δασική βλάστηση

Η λεκάνη καλύπτεται από αμιγές δάσος υβριδογενούς ελάτης (*Abies borisii-regis*), υποκηπευτοειδούς μορφής και μέσης ηλικίας 90 ετών. Ειδικότερα, η περιοχή μελέτης κατατάσσεται φυτοκοινωνικά στην υποζώνη της οξιάς (*Fagion moesiaca*), της ζώνης δασών οξυάς-ελάτης και ορεινών παραμεσογειακών κωνοφόρων (*Fagetalia*) (ορεινή-υπαλπική) και συγκεκριμένα στον αυξητικό χώρο της υβριδογενούς ελάτης (*Abietum borisii regis*). Είναι κωνοφόρο δέντρο, το οποίο θεωρείται ότι δεν αποτελεί συγκεκριμένο είδος, αλλά πληθυσμό υβριδίων που προήλθε από διασταύρωση λευκής και κεφαλληνιακής ελάτης κατά την τελευταία παγετώδη περίοδο (Αθανασιάδης, 1986). Ως υβριδογενής πληθυσμός, συνδυάζει μορφολογικά χαρακτηριστικά και βιολογικές απαιτήσεις και των δύο. Πρόκειται για μεσόφυτο είδος, δηλαδή απαιτεί νωπό μέχρι μέτρια νωπό έδαφος (Ντάφης 1986), ενώ δεν είναι ιδιαίτερα θερμόβιο.

Ορισμένα από τα μη ξυλώδη, αγρωστώδη και ψυχανθή φυτά, που συνθέτουν την αυξημένη παρεδαφιαία βλάστηση είναι: *Pteris aquilina* (κ. Πτέρη), *Helleborus cyclophillus* (κ. Θυμάρι το έρπον), *Fragaria vesca* (κ. Αγριοφράουλα), *Rubus hirtus* (Βάτος ο αδρότριχος), *Dactylis glomerata* (Δαχτυλίδα η συσπειρωμένη), *Trifolium repens* (Έρπον τριφύλλι ή λευκό), *Poa nemoralis* (Πόα των δασών), *Brachypodium silvaticum* (Βραχυπόδιο το δασικό), *Festuca ovina* (Φεστούκα η πρόβεια κ. τούφα), *Poa trivialis* (Πόα η κοινή) (Δασαρχείο Καρπενησίου, 2008).

2.5 Εξοπλισμός μετρήσεων

Το ΙΜΔΟ&ΤΔΠ - Τομέας Υδρολογίας, για την υλοποίηση των δασικών ερευνητικών προγραμμάτων του, έχει εγκαταστήσει στην περιοχή μελέτης υδρομετεωρολογικά όργανα, τα οποία αναφέρονται συνοπτικά:

- Τα μετεωρολογικά στοιχεία που παρατέθηκαν στους Πίνακες 2.1, 2.2 και 2.3, έχουν συλλεχθεί από δύο συμβατικούς θερμοϋγραγράφους, τύπου Lambrecht και Fischer. Είναι εγκατεστημένοι στο μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής, στη δασική θέση Μπλο (Εικόνα 2.5), με συντεταγμένες X:315016,116, Y:4306318,073 (Ελληνικό

Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς - ΕΓΣΑ'87). Βρίσκονται σε υπερθαλάσσιο ύψος 1120 m και σε απόσταση 1400 m από την έξοδο της πειραματικής λεκάνης. Οι ταινίες που χρησιμοποιούν καταγράφουν εβδομαδιαίες μετρήσεις. Επιπρόσθετα, στην ίδια θέση υπάρχει εγκατεστημένος μετεωρολογικός κλωβός που περιέχει δύο συμβατικά υδραργυρικά θερμομέτρα, θερμό και υγρό, για τον προσδιορισμό της υγρασίας και τη βαθμονόμηση των υγρογράφων.

- Οι μετρήσεις ύψους βροχής προέρχονται από βροχογράφο τύπου Belfort 300 mm (βροχογράφος 5), ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε απόσταση 70 μέτρων από την έξοδο της λεκάνης και σε υψόμετρο 1126 m (Εικόνα 2.6). Οι συντεταγμένες του είναι X:314695,247, Y: 4304968,338. Όπως και τα προηγούμενα όργανα καταγράφει σε εβδομαδιαία βάση.
- Τα στοιχεία απορροής της υδρολογικής λεκάνης ελήφθησαν από τον υδρομετρικό σταθμό που λειτουργεί στην έξοδο της λεκάνης, στη θέση Ρέματα, με τριγωνικό εκχειλιστή γωνίας 120° (Εικόνα 2.7). Είναι εφοδιασμένος με σταθμηγράφο τύπου SEBA. Βρίσκεται σε υψόμετρο 1111 m, με συντεταγμένες X:314622,951, Y:4304970,029. Η αλλαγή των ταινιών καταγραφής του πραγματοποιείται σε μηνιαία βάση.



Εικόνα 2.5: Μετεωρολογικός σταθμός της περιοχής μελέτης
(Πηγή: ΙΜΔΟ&ΤΔΠ)



Εικόνα 2.6: Βροχογράφος από τον οποίο συλλέχθηκαν τα δεδομένα βροχόπτωσης (Πηγή: ΙΜΔΟ&ΤΔΠ)



Εικόνα 2.7: Υδρομετρικός σταθμός με τριγωνικό εκχειλιστή στην έξοδο της πειραματικής λεκάνης (Πηγή: ΙΜΔΟ&ΤΔΠ)

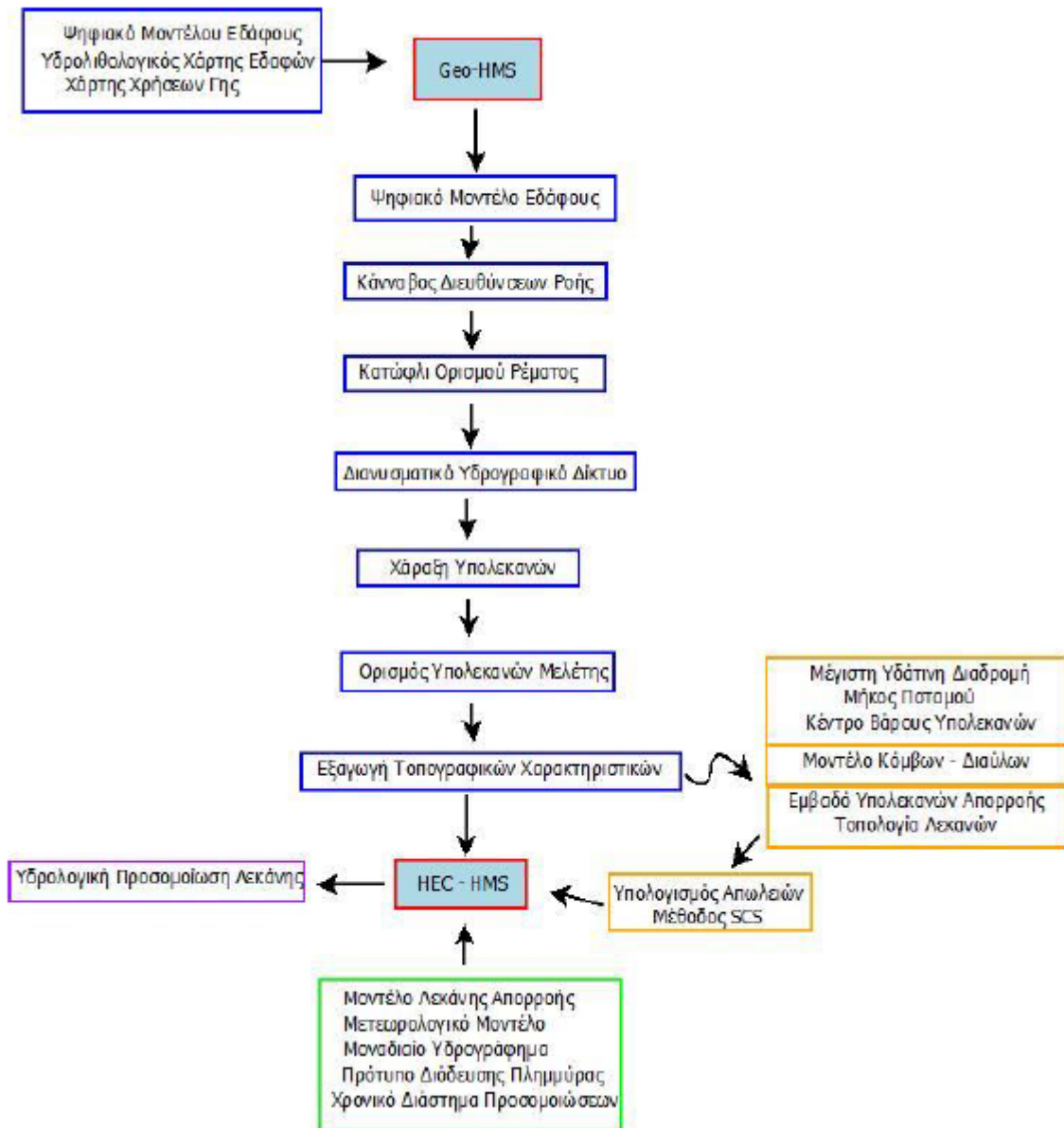
Επίσης, για την εξυπηρέτηση ερευνητικών σκοπών είναι εγκατεστημένη στην περιοχή πειραματική επιφάνεια, όπου είναι τοποθετημένοι συλλεκτήρες για τη μέτρηση και χημική ανάλυση της διαπερώσας βροχής, καθώς και για τον προσδιορισμό της ομιγλοβροχής. Στην εικόνα 2.8 φαίνεται μια πανοραμική άποψη της περιοχής μελέτης και των θέσεων των οργάνων μέτρησης.



Εικόνα 2.8: Θέση οργάνων μέτρησης (Πηγή: Google Earth μετά από επεξεργασία)

3. Υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής

Στο παρακάτω διάγραμμα περιγράφεται σχηματικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής:



Διάγραμμα 3.1: Διαδικασία εκτέλεσης υδρολογικής προσομοίωσης μέσω του προγράμματος HEC-HMS (Πηγή: Παγάνα, 2012)

3.1 Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση λεκάνης

Η ανάλυση των γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον λειτουργίας ArcMap v. 9.3 (ArcGIS-ESRI) και μέσω της πρόσθετης επέκτασης HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension). Πρόκειται για ένα γεωχωρικό υδρολογικό εργαλείο που αναπτύχθηκε από το Κέντρο Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center-HEC) του Σώματος Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (US Army Corps of Engineers-USACE), το οποίο χρησιμοποιεί το λογισμικό ArcGIS και την επέκταση Spatial Analyst με σκοπό τη δημιουργία αρχείων εισόδου για την υδρολογική προσομοίωση στο πρόγραμμα HEC-HMS.

Το HEC-GeoHMS επιτρέπει στο χρήστη την οπτικοποίηση της χωρικής πληροφορίας, την καταγραφή χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, την οριοθέτηση υπολεκανών απορροής και ρεμάτων, και την παραγωγή αρχείων εισόδου απευθείας σε λογισμικά υδρολογικών μοντέλων (Fleming and Doan, 2010). Με τη συγκέντρωση και οργάνωση των απαιτούμενων εντολών για την προετοιμασία τοπογραφικών και εδαφολογικών δεδομένων συντελείται η άντληση των απαραίτητων παραγόμενων δεδομένων τα οποία είναι χρήσιμα στην μοντελοποίηση του συστήματος βροχής-απορροής της υπό μελέτη λεκάνης.

Ως αρχεία εισόδου για την ανάλυση χρησιμοποιούνται, σε ψηφιδωτή μορφή (raster) το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (ΨΜΕ-DEM) και σε διανυσματική μορφή (vector) ο υδρολιθολογικός χάρτης εδαφών, ο χάρτης χρήσεων γης της περιοχής, καθώς και κάποια άλλα βοηθητικά αρχεία χωρικών δεδομένων σε διανυσματική μορφή, όπως αυτό του υδρογραφικού δικτύου. Η επεξεργασία και η ανάλυση αυτών των χωρικών δεδομένων συνίσταται στη χάραξη των υπολεκανών απορροής και του υδρογραφικού δικτύου και τον προσδιορισμό των υδρολογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών τους, σε μορφή συμβατή για χρήση αυτών στο HEC-HMS (Γκιόκας, 2009).

Τα αρχεία που εξάγονται και θα αποτελέσουν στη συνέχεια αρχεία εισόδου στο πρόγραμμα HEC-HMS, είναι τα ακόλουθα:

- Αρχείο χάρτη (background map file): σε αυτό οπτικοποιούνται οι υπολεκάνες απορροής και τα υδατορεύματα της περιοχής μελέτης
- Αρχείο μοντέλου λεκάνης απορροής (basin model file): περιέχει τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης

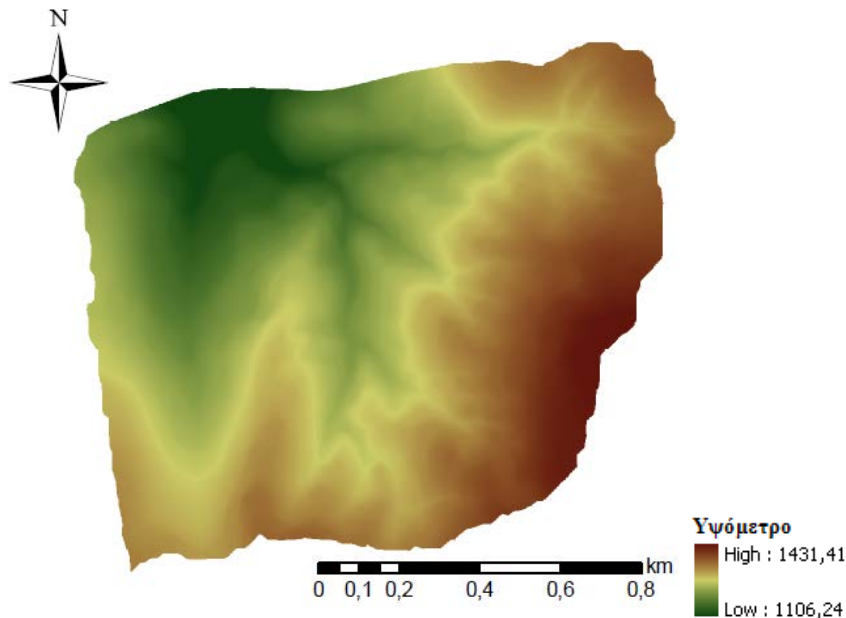
Τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου, που απαιτούνται για τη λειτουργία του HEC-HMS, είναι τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα, καθώς επίσης και ορισμένες παράμετροι για την εφαρμογή των μαθηματικών προτύπων του HEC-HMS.

Συνοπτικά, οι εργασίες που επιτελούνται είναι οι εξής:

- Δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους
- Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους
- Επεξεργασία λεκάνης και εξαγωγή υδρολογικών και γεωμορφολογικών δεδομένων
- Επιλογή προτύπων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων και δημιουργία αρχείου εισόδου HEC-HMS

3.1.1 Σύνθεση ψηφιακού μοντέλου εδάφους

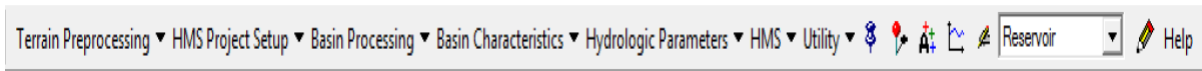
Για την εκκίνηση της διαδικασίας απαιτείται ως αρχικό δεδομένο, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος. Ωστόσο, δεν υπήρχαν διαθέσιμα ψηφιοποιημένα αρχεία. Για το λόγο αυτό, το πρωτογενές ΨΜΕ (Εικόνα 3.1) παράχθηκε από την ψηφιοποίηση χαρτών κλίμακας 1:5000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού (Γ.Υ.Σ.), χωρικής ανάλυσης 5 m (Φ.Χ. Γ.Υ.Σ. 5266/1, 5266/2, 5266/3, 5266/4), οι οποίοι και ψηφιοποιήθηκαν αφού πρώτα γεωαναφέρθηκαν στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87, χρησιμοποιώντας συντεταγμένες γνωστών σημείων. Η επεξεργασία του ΨΜΕ και ο καθορισμός των ορίων της λεκάνης απορροής πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον εργασίας ArcGIS.



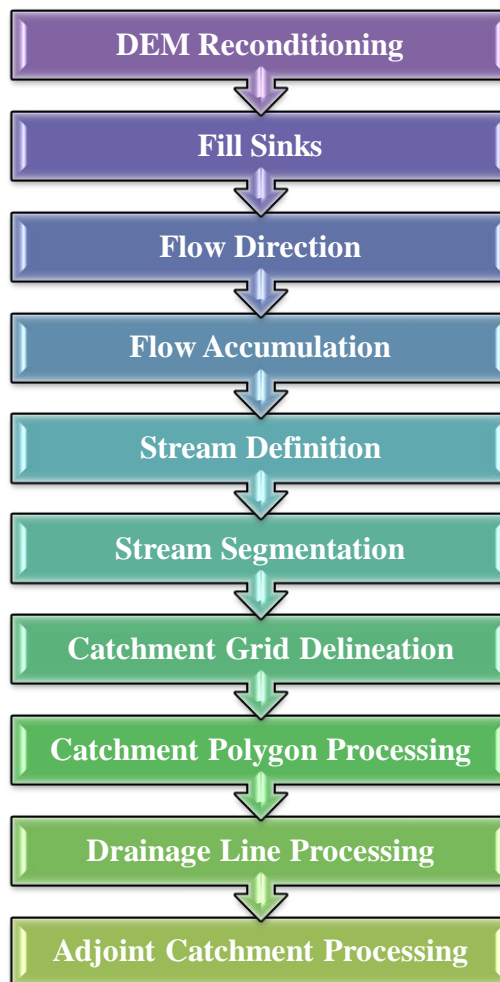
Εικόνα 3.1: Αρχικό ΨΜΕ περιοχής μετά από επεξεργασία

3.1.2 Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Στο στάδιο αυτό γίνεται η επεξεργασία των υδρολογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, μέσω της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS (Εικόνα 3.2) και των εντολών του μενού Terrain Preprocessing (Διάγραμμα 3.2).



Εικόνα 3.2: Εργαλειοθήκη HEC-GeoHMS



Διάγραμμα 3.2: Διάγραμμα ροής προεπεξεργασίας ΨΜΕ μέσω του μενού Terrain Preprocessing

Επεξήγηση των εντολών:

- **DEM Reconditioning:** Ανακατανομή των κελιών του καννάβου του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, κατά μήκος των ρεμάτων, με σκοπό τη διόρθωση ελλειπών ή λανθασμένων υψομέτρων που προέκυψαν κατά την υψομετρική αποτύπωση. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται η ακριβέστερη αποτύπωση της κοίτης του ποταμού.
- **Fill Sinks:** Απαλοιφή τυχόν ψευδών βυθισμάτων (ένα ή περισσότερα φατνία με μικρότερη τιμή υψομέτρου από τα γειτονικά τους) στο ανάγλυφο, ώστε να μην απομονώνουν τμήματα της λεκάνης. Αυξάνεται το υψόμετρο των φατνίων (cells) του περιβάλλοντος εδάφους και το νερό δεν εγκλωβίζεται παρακωλύοντας τη ροή του νερού και, κατ' επέκταση, την υδρολογική ανάλυση.
- **Flow Direction:** Δημιουργία του καννάβου διεύθυνσης απορροής. Πρόκειται για ένα αρχείο σε μορφή raster (grid), όπου η διεύθυνση της ροής από κάθε εικονοστοιχείο του κανάβου του ΨΜΕ, προς ένα από τα γειτονικά του, ορίζεται κατά την διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, συνυπολογίζοντας και την μεταξύ τους απόσταση. Αυτό συμβαίνει διότι το νερό τείνει να ρέει από τα σημεία μεγαλύτερου υψομέτρου προς τα σημεία χαμηλότερου. Υπολογίζονται, δηλαδή, οι κλίσεις προς κάθε ένα από τα λοιπά οκτώ φατνία βάσει του παρακάτω τύπου:

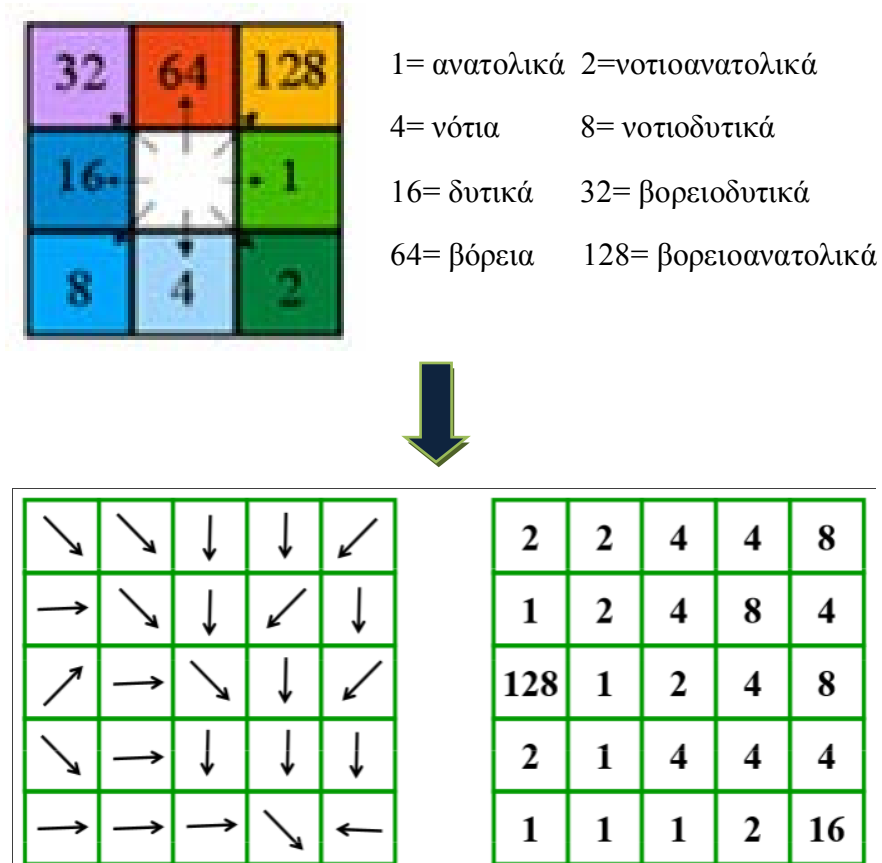
$$\text{Κλίση} = \Delta z / \Delta x$$

όπου

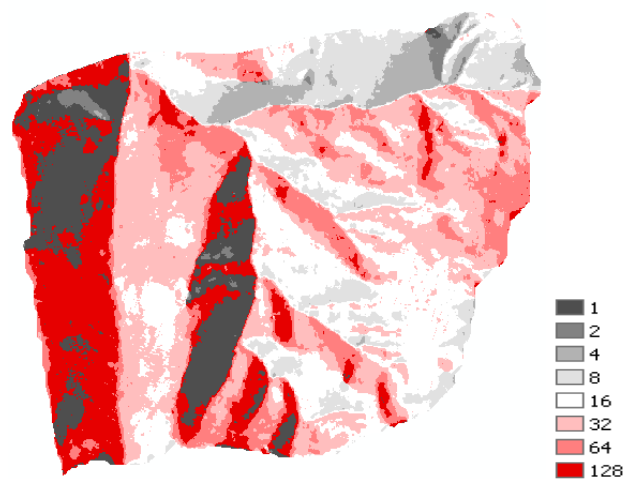
Δz : η διαφορά των τιμών του υψομέτρου και

Δx : η απόσταση μεταξύ γειτονικών κελιών

Η απόσταση Δx μετράται από τα κεντροειδή των κελιών και είναι ίση με 1 όταν γειτνιάζουν έχοντας κοινή μια πλευρά και ίση με $\sqrt{2}$ όταν έχουν μια κορυφή κοινή (Μισθού, 2006). Εφόσον υπολογιστεί η πλέον μέγιστη κλίση, η πληροφορία της διεύθυνσης της ροής κωδικοποιείται όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Η προσέγγιση αυτή αναφέρεται ως «μοντέλο ροής 8 κατευθύνσεων» (D8) και ακολουθεί τη θεωρία που παρουσιάστηκε από τους Jenson και Domingue (1988). Ο κανάβος που προέκυψε απεικονίζεται στην Εικόνα 3.4.

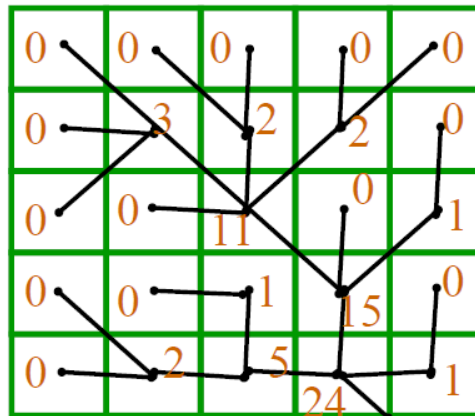


Εικόνα 3.3: Διαδικασία υπολογισμού κανάβου διεύθυνσης απορροής (Πηγή: Στάμου-Σκοπελίτη, 2009)



Εικόνα 3.4: Κανάβος διεύθυνσης απορροής

- Flow Accumulation: Σύνθεση του κανάβου συγκεντρωτικής ροής από τον κανάβο διεύθυνσης απορροής. Η συγκεντρωτική ροή για κάθε φατνίο του κανάβου, ανάντη της κοίτης, ισούται με το άθροισμα των φατνίων που αποστραγγίζονται σε αυτό από τα γειτονικά του. Έτσι, σε κάθε κύτταρο καταχωρείται μία τιμή που φανερώνει τον αριθμό των κυττάρων διαμέσου των οποίων διέρχεται το νερό (Εικόνα 3.5). Φατνία με υψηλές τιμές αντιστοιχούν στις μισγάγγειες, ενώ με μηδενικές τιμές στις κορυφογραμμές. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο κανάβος που παράχθηκε (Εικόνα 3.6).

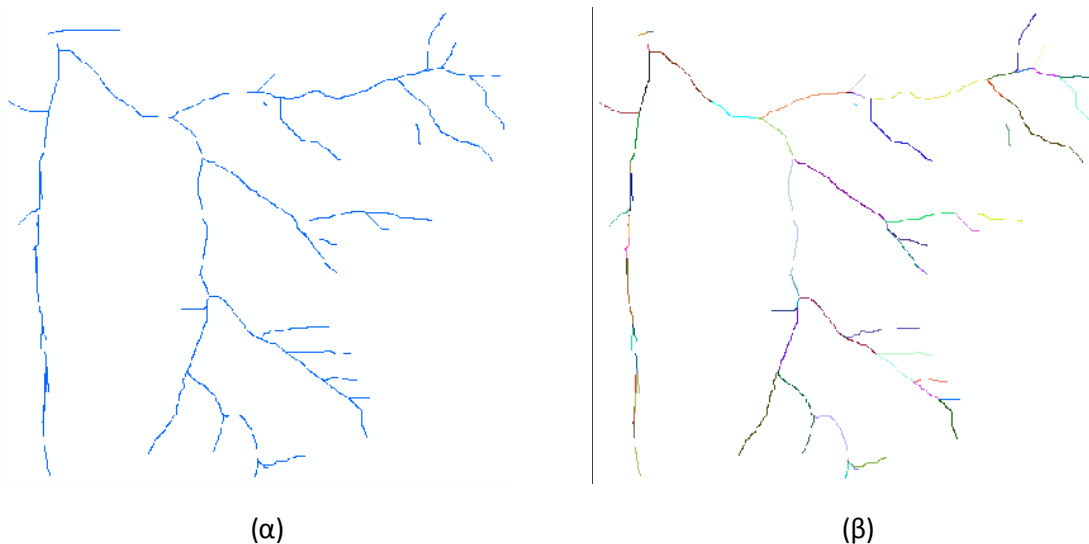


Εικόνα 3.5: Κανάβος αθροίσματος φατνίων απορροής
(Πηγή: Στάμου-Σκοπελίτη, 2009)



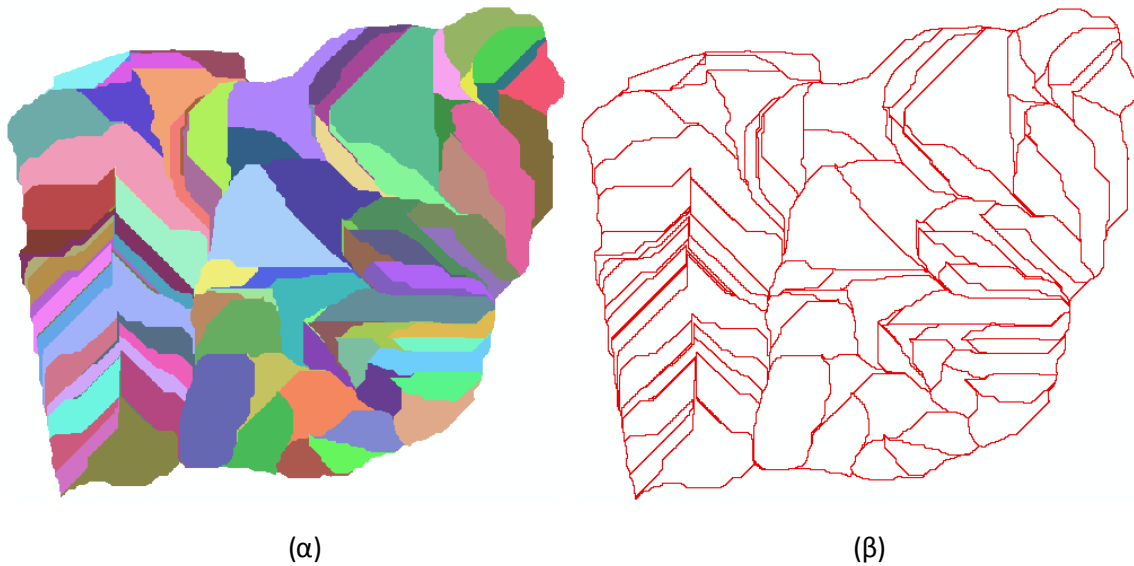
Εικόνα 3.6: Κανάβος συγκεντρωτικής ροής

- **Stream Definition**: Με τον ορισμό ενός κατώφλιού από το χρήστη, στην τιμή της συγκεντρωτικής ροής, και με την παραδοχή ότι για τιμές μικρότερες αυτού δεν υφίσταται συγκεντρωτική ροή, απεικονίζεται ένα αποστραγγιστικό δίκτυο πλήρως συνδεδεμένο (Chang, 2003). Έτσι σχηματοποιείται το δίκτυο ροής της εξεταζόμενης περιοχής (Εικόνα 3.7.α). Όσο μικρότερο κατώφλι επιλέγεται, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου τόσο και, κατ' επέκταση ο αριθμός των υπολεκανών που θα οριοθετηθούν σε επόμενο στάδιο της επεξεργασίας.
- **Stream Segmentation**: Κατάτμηση του υδρογραφικού δικτύου με συνδυασμό των κανάβων του υδρογραφικού δικτύου και της διεύθυνσης απορροής (Εικόνα 3.7.β). Πρόκειται για τα τμήματα του υδατορεύματος που συνδέουν επιτυχώς δύο διαδοχικούς κόμβους (junctions), ένα κόμβο με την έξοδο της λεκάνης ή ένα κόμβο με τμήμα της απορροής.



Εικόνα 3.7: (α) Υδρογραφικό δίκτυο, (β) Κατάτμηση του υδατορεύματος

- **Catchment Grid Delineation**: Οριοθέτηση των υπολεκανών για κάθε τμήμα του υδατορεύματος, όπως αυτά προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία (Εικόνα 3.8.α).
- **Catchment Polygon Processing**: Μετατροπή του αρχείου grid των υπολεκανών σε διανυσματική μορφή (Εικόνα 3.8.β).

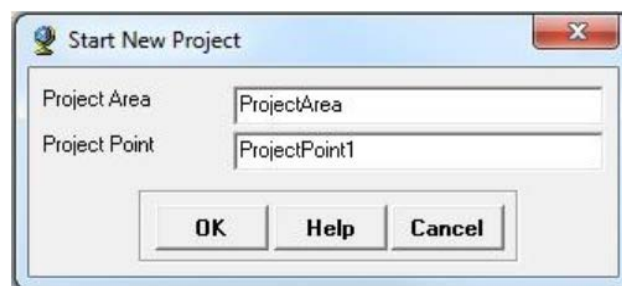


Εικόνα 3.8: (α) Οριοθέτηση υπολεκανών βάσει υδρογραφικού δικτύου σε μορφή πλέγματος (grid) και (β) σε διανυσματική μορφή

- **Drainage Line Processing:** Μετατροπή του αρχείου grid του υδρογραφικού δικτύου σε διανυσματική μορφή. Στην ακόλουθη εικόνα εμφανίζονται οι λεκάνες και το δίκτυο ροής της περιοχής.
- **Adjoint Catchment Processing:** Ένωση όλων των ανάντη υπολεκανών σε κάθε συμβολή του ποταμού. Αναγκαίο βήμα για τη βελτίωση της υπολογιστικής ισχύς του προγράμματος, χωρίς κάποια υδρολογική σημασία (Fleming and Doan, 2010).

3.1.3 Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου του HEC-HMS

Μετά την ολοκλήρωση της υδρολογικής ανάλυσης της περιοχής διαμορφώνονται τα αρχεία εισόδου για το HEC-HMS μέσω του μενού HMS Project Setup. Η διαδικασία ξεκινά με την εντολή Start New Project (Εικόνα 3.9).




Εικόνα 3.9: Δημιουργία αρχείων εισόδου για το HEC-HMS

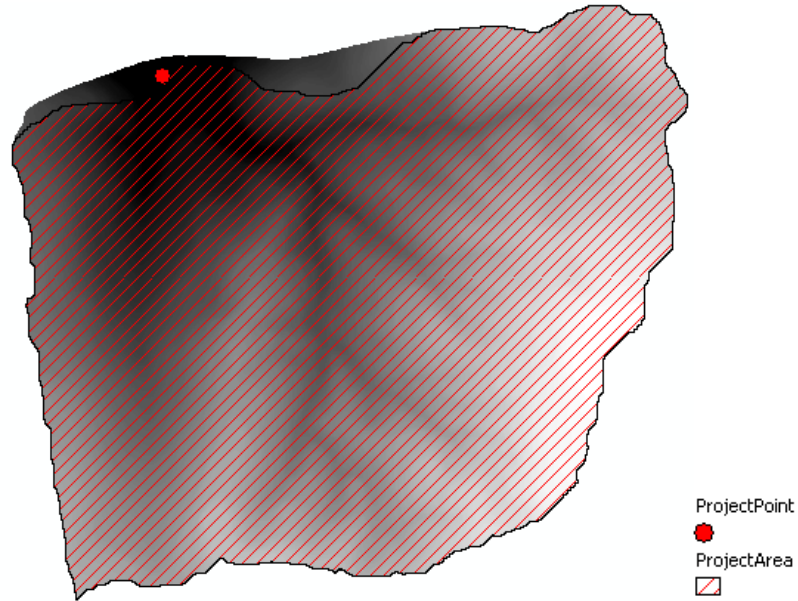
Δημιουργείται το αρχείο της μελέτης, στο οποίο δίνεται όνομα, και γίνεται αντιστοίχιση των επιπέδων και ορίζονται οι μήτρες δεδομένων για τα δεδομένα, όπως αυτά αναφέρονται στην Εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10: Μήτρες δεδομένων για την δημιουργία αρχείων εισόδου του HEC-HMS

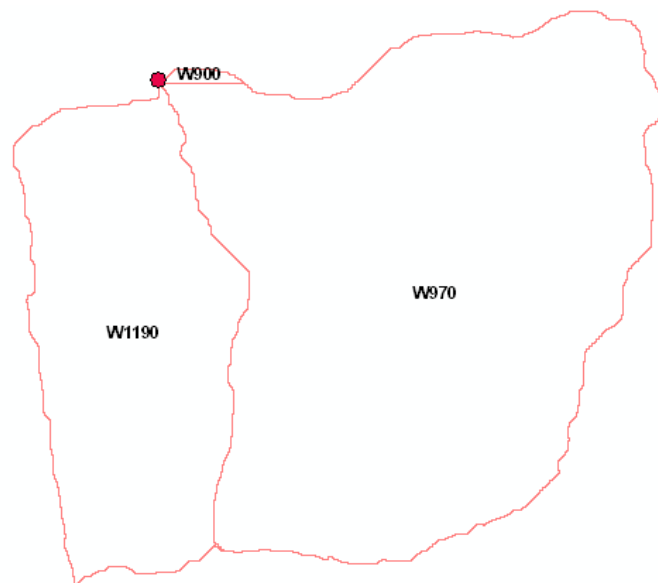
Εν συνεχεία, ο χρήστης μπορεί να ορίσει την υπό μελέτη περιοχή, εφόσον είναι μικρότερη από αυτή που μέχρι τώρα εξεταζόταν. Δημιουργούνται δύο επιπλέον αρχεία, όπως προαναφέρθηκε, τα Project Point και Project Area. Έτσι, προσδιορίζεται η έξοδος της λεκάνης με το εργαλείο Add Project Points (). Με την εντολή Generate Project ανιχνεύεται η λεκάνη απορροής που στραγγίζει σε αυτό το σημείο και παράγεται, με αυτό τον τρόπο, η περιοχή μελέτης (Project Area), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.11. Παράλληλα δημιουργείται η βάση γεωχωρικών δεδομένων ώστε να γίνει σωστή η συσχέτιση των επιπέδων.

Επίσης, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας υπολεκανών στα σημεία όπου υπάρχουν σταθμοί μέτρησης απορροής. Καθίσταται, έτσι, εφικτός ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της υδρολογικής προσομοίωσης, με δεδομένα μετρήσεων που μπορεί να υπάρχουν στις εξόδους των λεκανών. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε μετρήσεις μόνο από έναν σταθμηγράφο που βρίσκεται στην έξοδο της λεκάνης.



Εικόνα 3.11: Περιοχή μελέτης

Σε επόμενο στάδιο, μέσω της εντολής Basin Merge του μενού Basin Processing, συνενώνονται δύο γειτονικές λεκάνες σε μία νέα υπολεκάνη. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου προκύψει ο τελικός αριθμός υπολεκανών. Παρακάτω (Εικόνα 3.12) παρουσιάζεται το τελικό σχήμα της εξεταζόμενης περιοχής με τις τρεις υπολεκάνες που δημιουργήθηκαν. Οι κωδικοί αποδίδονται αυτόματα μέσω του προγράμματος.



Εικόνα 3.12: Τελική διαμόρφωση υπολεκανών και ονομασία τους

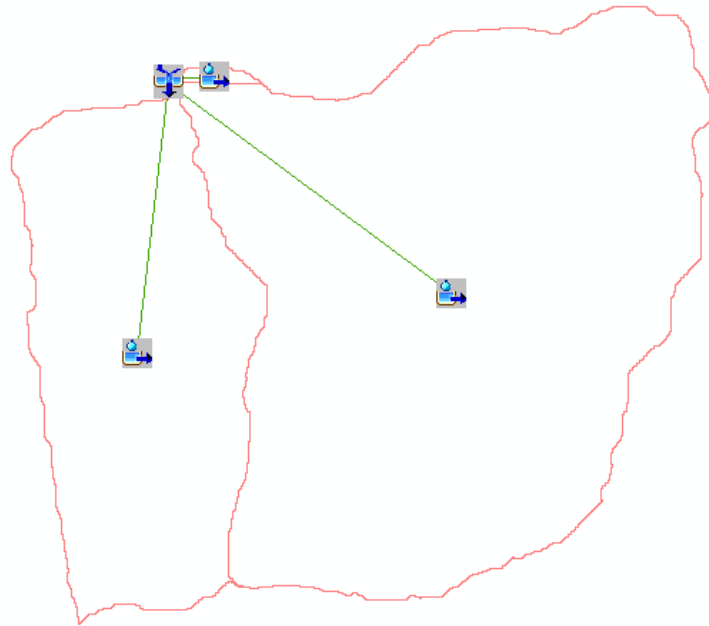
Αφού ολοκληρωθούν όλες οι ανωτέρω διεργασίες εξάγονται διάφορα τοπογραφικά χαρακτηριστικά του υδρογραφικού δικτύου και των υπολεκανών, με χρήση του πακέτου εντολών Basin Characteristics. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται το μήκος και η μέση κλίση του ποταμού, οι κλίσεις των υπολεκανών απορροής, το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής μιας λεκάνης μέχρι την έξοδό της, το κέντρο βάρους της κάθε υπολεκάνης και το υψόμετρό του, το μήκος της υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδο της. Με την χρήση των παραπάνω αρχείων σχηματοποιείται το υδρογραφικό δίκτυο, σε μορφή συμβατή με το HEC-HMS.

Στην τελευταία φάση της προετοιμασίας και προεπεξεργασίας των γεωχωρικών δεδομένων για εισαγωγή στο HEC-HMS ο χρήστης έχει την ευχέρεια να εισάγει τα πρότυπα για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης, ήτοι το πρότυπο υπολογισμού των απωλειών βροχής, της άμεσης απορροής, της βασικής απορροής και της διόδευσης πλημμύρας. Ωστόσο, είναι εφικτό τα πρότυπα αυτά να αλλάξουν κατά την μετέπειτα επεξεργασία στο HEC-HMS, ή και να επιλεγούν κατευθείαν μέσα από το περιβάλλον λειτουργίας του προγράμματος, όπως έγινε και στην παρούσα εργασία. Έτσι, με μια αλληλουχία εντολών του μενού HMS, της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS, δημιουργείται το μοντέλο της υδρολογικής προσομοίωσης ενώ τα δεδομένα του υδρολογικού δικτύου κωδικοποιούνται σε μορφή ASCII. Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται σχηματικά στο Διάγραμμα 3.3.



Διάγραμμα 3.3: Δημιουργία υποβάθρου HMS

Ενδεικτικά παρατίθενται τα αποτελέσματα των εντολών HMS Schematic και Toggle Legend (Εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.13: Δίκτυο σύνδεσης παραμέτρων και εικονίδια υπομνήματος του υδρολογικού μοντέλου

3.2 Λογισμικό HEC-HMS

Από τα πλέον διαδεδομένα και εύχρηστα εργαλεία για μελέτες πλημμυρών είναι το HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System), εξέλιξη του HEC1, που αναπτύχθηκε από το Κέντρο Τεχνικής Υδρολογίας του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων που ανήκει στο Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού. Σχεδιάστηκε ώστε να προσομοιώνει τις υδρολογικές διαδικασίες βροχής απορροής για δενδριτικού τύπου λεκάνες και είναι εφαρμόσιμο σε ένα μεγάλο εύρος περιοχών, τόσο σε μεγάλες αγροτικές λεκάνες, όσο και σε μικρές αστικές ή ημιαστικές.

Στην πραγματικότητα, δεν πρόκειται για μεμονωμένο μοντέλο αλλά υπολογιστική πλατφόρμα, η οποία υποστηρίζει εναλλακτικές εκδοχές μοντέλων για τις διάφορες διεργασίες του κύκλου μιας πλημμύρας (κατά κανόνα σε επίπεδο επεισοδίου), συγκεκριμένα:

- Μοντέλα εκτίμησης υδρολογικών ελλειμμάτων
- Μοντέλα εκτίμησης άμεσης απορροής
- Μοντέλα εκτίμησης βασικής απορροής
- Μοντέλα διόδευσης πλημμυρών

Υιοθετεί μια ημικατανεμημένη σχηματοποίηση της λεκάνης. Σε κάθε υπολεκάνη και για κάθε διεργασία μπορούν να οριστούν διαφορετικά μοντέλα ή διαφορετικές παράμετροι του ίδιου μοντέλου (Ευστρατιάδης κ.ά., 2012).

Τα υδρογραφήματα που παράγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτούσια ή ως είσοδος σε άλλα λογισμικά. Χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων, καθώς η χρησιμότητά τους είναι εμφανής σε περιπτώσεις όπως: μελέτες διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, αποστραγγιστικά έργα, μελέτες πρόγνωσης πλημμυρών, σχεδιασμό υπερχειλιστών φραγμάτων κ.α. (Feldman 2000).

Το πρόγραμμα αποτελεί ένα γενικευμένο σύστημα μοντελοποίησης, ικανό να αναπαριστά πολλές διαφορετικές μεταξύ τους λεκάνες. Ένα μοντέλο λεκάνης κατασκευάζεται, με διαίρεση του υδρολογικού κύκλου σε εύκολα διαχειρίσιμα τμήματα-συνιστώσες και οριοθέτηση της εξεταζόμενης λεκάνης. Οποιαδήποτε ροή μάζας ή ενέργειας μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα από μαθηματικό μοντέλο. Η ορθή επιλογή απαιτεί γνώση των συνθηκών της λεκάνης και εξαρτάται από τους στόχους της υδρολογικής μελέτης και την εμπειρία του μελετητή (Scharffenberg and Fleming, 2010). Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η έκδοση HEC-HMS 3.5.

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι τα επεισόδια που επιλέχθηκαν για την αρχική προσομοίωση είναι τα: 1/7/2001 και 29/8/2002.

3.2.1 Μοντέλο λεκάνης απορροής

Αρχικά, εισάγεται το μοντέλο της λεκάνης απορροής (basin model), όπως αυτό δημιουργήθηκε στο περιβάλλον του GIS, με χρήση της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την επιλογή File>> Import>> Basin Model (Σχήμα 3.12). Δίνεται, επίσης, η δυνατότητα για παράθεση των χαρτών της λεκάνης και του ποταμού, ως υπόβαθρο για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων (Εικόνα 3.14).

Τα εικονίδια ερμηνεύονται ως εξής:



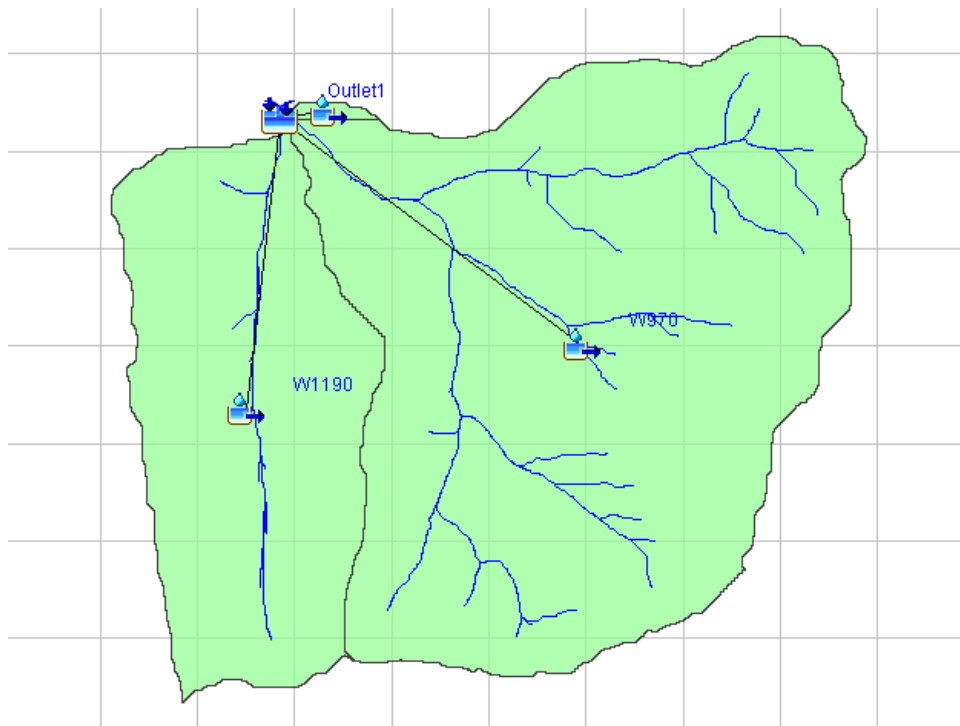
Υπολεκάνη (subbasin)



Σύνδεσμος-κόμβος (junction)



Έξοδος (outlet)



Εικόνα 3.14: Μοντέλο λεκάνης απορροής σε περιβάλλον HEC-HMS

Οι υπολεκάνες που προέκυψαν από την επεξεργασία είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 3.1: Εμβαδά υπολεκανών περιοχή μελέτης

Υπολεκάνη	Εμβαδόν (km ²)
W970	1.011
W900	0.005
W1190	0.431

Η κατάρτιση του μοντέλου λεκάνης προϋποθέτει την επιλογή των μαθηματικών προτύπων που θα χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση.

3.2.1.1 Απώλειες βροχής γενικά

Μετά τη βροχόπτωση και πριν την έναρξη της απορροής αρχίζουν διάφορες διεργασίες που συντελούν στις απώλειες βροχής. Πιο συγκεκριμένα, από την ποσότητα της βροχής και πριν αυτή φτάσει στο έδαφος, ένα μέρος συγκρατείται από τη βλάστηση και άλλα εμπόδια. Η ποσότητα που παραμένει αποθηκευμένη πάνω στη φυτοκόμη εξατμίζεται ή απορροφάται από αυτή (απώλεια συγκράτησης). Έπεται η πτώση της βροχής που υπερβαίνει τη χωρητικότητα παρεμπόδισης στο έδαφος, μέσω της διάπτωσης ή της κομορροής, η οποία ακολουθείται από το φαινόμενο της διήθησης που αποτελεί επίσης απώλεια. Καθίσταται λοιπόν απαραίτητος ο υπολογισμός αυτών των απωλειών και εν τέλει του ενεργού όγκου της βροχόπτωσης που δημιουργεί την απορροή.

Όσον αφορά την εξατμισοδιαπνοή, σε μεγάλη χρονική κλίμακα, παραδείγματος χάρη, ετήσια ή υπερετήσια, αποτελεί την διαφορά ανάμεσα στα κατακρημνίσματα και την απορροή της υδρολογικής λεκάνης. Σε μικρότερη χρονική κλίμακα, όπως ωριαία, οι απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής στην διάρκεια ενός γεγονότος βροχόπτωσης θεωρούνται αμελητέες σε σύγκριση με τον όγκο απορροής λόγω της έντασης της βροχόπτωσης και οι διαφορές ανάμεσα στον όγκο υετού και απορροής αποδίδονται στις φυσικές διεργασίες της κατακράτησης και της διήθησης (Καψάλης, 2009).

3.2.1.2 Εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων με τη μέθοδο SCS

Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν μετρήσεις για τις διάφορες απώλειες, η εκτίμηση του περισσεύματος βροχής καθίσταται δύσκολη. Αναγκαστικά οι μέθοδοι προσδιορισμού των συνολικών ελλειμμάτων αδιακρίτως, δεν μπορεί παρά να είναι εμπειρικές ή ημιεμπειρικές, αφού δεν κάνουν ακριβή θεώρηση των μηχανισμών που τα δημιουργούν. Τα βασικά τους όμως πλεονεκτήματα είναι η εύκολη χρήση και ο μικρός αριθμός παραμέτρων (συνήθως μία) που χρησιμοποιούν (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η Υπηρεσία Διατήρησης Φυσικών Πόρων (Natural Resources Conservation Service, πρώην SCS) του Υπουργείου Γεωργίας των ΗΠΑ (USDA), ανέπτυξε το 1972 μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο για τον υπολογισμό των απωλειών της βροχής, με χρήση του αριθμού καμπύλης απορροής (CN), αναφερόμενη και ως μέθοδο SCS. Η ανάπτυξη της μεθόδου στηρίχθηκε σε μελέτες σε μικρές καλλιεργήσιμες λεκάνες.

Η απλοποιημένη μορφή της μεθόδου περιλαμβάνει μόνο μία παράμετρο, η οποία είναι συνάρτηση των εδαφολογικών χαρακτηριστικών, των χρήσεων γης στη λεκάνη, καθώς των

προηγούμενων συνθηκών εδαφικής υγρασίας. Η μέθοδος υπολογίζει το ενεργό ύψος βροχής, δηλαδή την ποσότητα βροχής που απορρέει επιφανειακά, σύμφωνα με τη σχέση:

$$he = \begin{cases} 0 & h \leq I_a \\ \frac{(h - I_a)^2}{h - I_a + S} & h > I_a \end{cases} \quad (3.1)$$

όπου he : το ενεργό ύψος βροχής

h : το συνολικό ύψος βροχής

I_a : οι αρχικές απώλειες

Στη βιβλιογραφία, όπως έχει προκύψει από δεδομένα παρατηρήσεων, συστήνεται η παρακάτω παραδοχή:

$$I_a = 0,2S \quad (3.2)$$

όπου S : η δυνητικά μέγιστη κατακράτηση

Με την υπόθεση αυτή, η μέθοδος χρησιμοποιεί τελικώς μία μόνο παράμετρο, τη δυνητικά μέγιστη κατακράτηση S , οπότε η εξίσωση (3.2) γράφεται:

$$he = \begin{cases} 0 & h \leq 0,2S \\ \frac{(h - 0,2S)^2}{h + 0,8S} & h > 0,2S \end{cases} \quad (3.3)$$

Η τιμή της παραμέτρου S μπορεί να εκτιμηθεί συναρτήσει της παραμέτρου CN (curve number) με την εμπειρική σχέση:

$$S(mm) = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad 0 \leq CN \leq 100 \quad (3.4)$$

Το πρότυπο του αριθμού καμπύλης CN της SCS, στην πραγματικότητα περιλαμβάνει μία παράμετρο (τον αριθμό καμπύλης CN) και μία αρχική συνθήκη (τις αρχικές απώλειες I_a). Οι παράμετροι αυτές αντιπροσωπεύουν τον τύπο του εδάφους, τις χρήσεις γης και τις συνθήκες εδαφικής υγρασίας στην αρχή του γεγονότος βροχόπτωσης που μελετάται. Για τον προσδιορισμό της παραμέτρου CN , η μέθοδος SCS κατατάσσει αρχικά τα εδάφη σε τέσσερις κατηγορίες με βάση τη διαπερατότητά τους. Τα εδάφη κατατάσσονται στην κατηγορία A, B, C, ή D ανάλογα με τα ακόλουθα κριτήρια (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006):

- A. Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης ακόμα και αν διαβραχούν διεξοδικά (πολύ χαμηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιέχουν πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια.
- B. Εδάφη με μέτριους ρυθμούς διήθησης, όπως για παράδειγμα αμμώδης πηλός.
- C. Εδάφη με χαμηλούς ρυθμούς διήθησης, όπως είναι τα εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.
- D. Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης (πολύ υψηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιλαμβάνουν αργιλώδη εδάφη με υψηλή πιθανότητα διόγκωσης ή ρηχά εδάφη πάνω σε σχεδόν αδιαπέρατο υλικό.

Οι αριθμοί καμπύλης διαχωρίζονται και ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Τέτοιες συνθήκες υγρασίας είναι (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006):

Κατάσταση I: Η κατάσταση κατά την οποία τα εδάφη είναι στεγνά, αλλά όχι στο σημείο μόνιμης μάρανσης και όταν λαμβάνει χώρα ικανή άρωση ή καλλιέργεια.

Κατάσταση II: Η μέση περίπτωση για ετήσιες πλημμύρες, δηλαδή ένας μέσος όρος των συνθηκών που προηγήθηκαν της μέγιστης ετήσιας πλημμύρας σε αρκετές λεκάνες απορροής.

Κατάσταση III: Αν έντονη βροχόπτωση ή ελαφρά βροχόπτωση και χαμηλές θερμοκρασίες έχουν συμβεί τις τελευταίες 5 ημέρες πριν τη δεδομένη καταιγίδα και το έδαφος είναι σχεδόν κορεσμένο.

Για την υδρολογική κατάσταση II, η SCS δίνει αναλυτικούς πίνακες με τιμές του αριθμού καμπύλης CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης. Μερικές ενδεικτικές τιμές δίνονται στον Πίνακα 3.2. Οι αριθμοί CN που αντιστοιχούν στις συνθήκες υγρασίας II και III, μπορούν να υπολογιστούν από πίνακες ή με τη βοήθεια τύπων, ως συνάρτηση του αριθμού CN για την κατάσταση II.

Πίνακας 3.2: Ενδεικτικοί αριθμοί καμπύλης CN για την υδρολογική κατάσταση II (Πηγή: Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006)

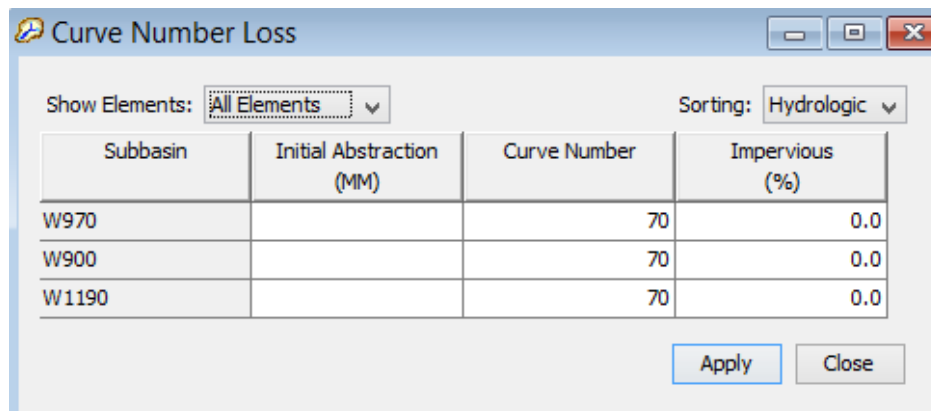
Χρήση γης	Υδρολογική κατάσταση	Κατηγορία εδάφους			
		A	B	C	D
Βοσκότοπος	Φτωχή	68	79	86	89
	Μέτρια	49	69	79	84
	Καλή	39	61	74	80
Δάσος	Φτωχή	45	66	77	83
	Μέτρια	36	60	73	79
	Καλή	25	55	70	77
Δρόμος (χώμα)	-	72	82	87	89
Δρόμος (σκληρή επιφάνεια)	-	74	84	90	92

Για τον καθορισμό της τιμής του αριθμού καμπύλης είναι απαραίτητη η γνώση των χρήσεων γης και της γεωλογίας της περιοχής μελέτης. Σε περιβάλλον GIS προσδιορίστηκαν τα πολύγωνα χρήσεων γης, η κατηγορία του εδάφους και ο βαθμός υδροπερατότητάς του. Αναλυτικότερα, με την ένωση του χάρτη των υπολεκανών και του γεωλογικού χάρτη της περιοχής, αλλά και από σχετικές μελέτες, προσδιορίστηκε ότι η εξεταζόμενη έκταση ανήκει ολοκληρωτικά στη ζώνη του φλύσχη. Σε συνδυασμό με τον υδρολιθολογικό χάρτη της Ελλάδας (συντάχθηκε το 1996 στα πλαίσια του σχεδίου προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας από τη Διεύθυνση Υδατικού Δυναμικού του Υπουργείου Ανάπτυξης) και το περιγραφικό του υπόμνημα, κατατάχθηκε το έδαφος της περιοχής στην ομάδα υδραπερατότητας C, κατά SCS. Στη συνέχεια, έγινε χρήση της εθνικής βάσης δεδομένων χρήσεων γης που έχει παραχθεί μέσω του προγράμματος CORINE Land Cover 2000, το οποίο έχει εκπονηθεί από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή κωδικοποίηση, στην εδαφική κάλυψη όλης της υπό μελέτη περιοχής αντιστοιχεί ο κωδικός 312, επαληθεύοντας ότι πρόκειται για δάσος κωνοφόρων. Επομένως και στις τρεις υπολεκάνες αποδόθηκε η ίδια αρχική τιμή στον αριθμό καμπύλης CN (Πίνακας 3.3).

Πίνακας 3.3: Αριθμοί καμπύλης CN για κάθε υπολεκάνη

Υπολεκάνη	CN
W970	70
W900	70
W1190	70

Έχοντας καταλήξει στις παραπάνω τιμές, επόμενο βήμα είναι να γίνει η εισαγωγή τους στο HEC-HMS από το μενού Parameters>> Loss>> SCS Curve Number, όπως φαίνεται την Εικόνα 3.15.



Εικόνα 3.15: Εισαγωγή δεδομένων για τον υπολογισμό των αρχικών ελλειμμάτων στο HEC-HMS

Ζητείται να προσδιοριστούν και άλλα δύο ακόμη πεδία που αναφέρονται στο αρχικό έλλειμμα (initial abstraction) και το ποσοστό των αδιαπέρατων σχηματισμών (impervious). Το πεδίο του αρχικού ελλείμματος δεν συμπληρώνεται αρχικά, με αποτέλεσμα να θεωρείται από το πρόγραμμα ότι ισούται με το 20% της δυνατικής μέγιστης κατακράτησης, θεωρία στην οποία βασίζεται και ο υπολογισμός του ενεργού ύψους βροχής. Η έκταση των αδιαπέρατων σχηματισμών σε όλες τις υπολεκάνες θεωρήθηκε μηδενική.

3.2.1.3 Πρότυπο εκτίμησης απωλειών παρεμπόδισης

Λόγω του δασικού χαρακτήρα της λεκάνης κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός της αρχικής απώλειας της κατακρήμνισης λόγω συγκράτησης από την κομοστέγη (canopy). Όπως προαναφέρθηκε, μέρος της βροχόπτωσης παρεμποδίζεται από τη φυτοκόμη, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ποσοστό ύδατος που φτάνει στο έδαφος. Επομένως, ο μηχανισμός αυτός έχει συνέπεια τη μείωση του όγκου απορροής, ενώ είναι υπεύθυνος και για τη χρονική υστέρησή της. Η απώλεια παρεμπόδισης εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της δασοσυστάδας, τα χαρακτηριστικά της βροχής και τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Η υδατοσυγκρατητική ικανότητα των κωνοφόρων ειδών είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα φυλλοβόλα πλατύφυλλα. Δεν έχουν φύλλωμα και το χειμώνα προστατεύουν-καλύπτουν το έδαφος συνεχώς από τα άμεσα χτυπήματα των σταγόνων της βροχής. Επίσης, τα δάση

κωνοφόρων, καταναλώνουν συνολικά περισσότερο νερό από ότι τα δάση πλατυφύλλων. Είναι λοιπόν, από υδρονομική άποψη, περισσότερο προστατευτικά και υδατοκαταναλωτικά είδη. Ενδείκνυται για υδρονομική διευθέτηση λεκανών απορροής, όχι όμως όπου επιδιώκεται αύξηση του απορρέοντος νερού. Εκεί το δάσος πλατυφύλλων είναι προτιμότερο (Νικολαΐδης, 1980).

Το γεγονός ότι η ποσότητα του νερού η οποία συγκρατείται από τη βλάστηση εξαμιζόμενη επιστρέφει και πάλι στην ατμόσφαιρα έκανε πολλούς μελετητές να σκεφτούν ότι αποτελεί μια πραγματική απώλεια από το υδατικό ισοζύγιο μιας υδρολογικής λεκάνης (Παπούλιας, 1975). Ανάλογα λοιπόν με το πρίσμα κάτω από το οποίο εξετάζεται η υδατοσυγκράτηση μπορεί να θεωρηθεί ως ευεργετική σε σχέση με τις πλημμύρες και τις διαβρώσεις και σαν επιζήμια σε σχέση με τις ανάγκες της βλάστησης σε νερό και τον εμπλουτισμό των υδροφόρων οριζόντων (Νικολαΐδης, 1980).

Η δυσκολία στον προσδιορισμό της απώλειας παρεμπόδισης έγκειται στο γεγονός ότι στον υπολογισμό της υπεισέρχονται αστάθμητοι παράγοντες (χαρακτηριστικά των βροχών, κλιματικές συνθήκες, προσανατολισμός, συνθήκες βλάστησης, ενδοδασικό περιβάλλον κλπ). Επιπροσθέτως, είναι σημαντικό να υπάρχει καταγεγραμμένη η βλάστηση σε ότι αφορά τη δομή και την σύνθεση της. Κάτι τέτοιο δεν ήταν διαθέσιμο για την περιοχή μελέτης και για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα.

Διάφοροι ερευνητές δίνουν διαφορετικές τιμές της μέγιστης δυνατότητας υδατοσυγκράτησης (κορεσμού) της κομοστέγης για τα διάφορα δασοπονικά είδη. Η υπό μελέτη λεκάνη καλύπτεται από αμιγές δάσος υβριδογενούς ελάτης (*Abies borisii-regis*). Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν μελέτες για το συγκεκριμένο είδος, υιοθετήθηκαν από τη βιβλιογραφία (Ντάφης, 1986, Aussenac, 1968) οι τιμές για το *Abies grandis*, είδος με παρόμοια μορφολογικά και βιολογικά χαρακτηριστικά.

Το HEC-HMS υπολογίζει τις απώλειες συγκράτησης χρησιμοποιώντας αντίστοιχα μοντέλα. Στην προκειμένη περίπτωση έγινε εφαρμογή της απλής μεθόδου υπολογισμού (simple canopy).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί ότι, κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό, είναι απαραίτητη η συμπλήρωση ενός ακόμα πεδίου με το ποσό της βροχής που είναι αποθηκευμένο στην κομοστέγη, στην αρχή της προσομοίωσης, εκφρασμένο ως ποσοστό της μέγιστης υδροαποθηκευτικότητας της βλάστησης. Το ποσοστό αυτό εκτιμήθηκε από δεδομένα προηγούμενων βροχοπτώσεων, για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα επεισόδια, που παραχωρήθηκαν από το ΙΜΔΟ&ΤΔΠ - Τομέας Υδρολογίας. Δεδομένου ότι πριν το επεισόδιο 1/7/2001 δεν έβρεξε για περίπου ένα μήνα και, όσον αφορά το επεισόδιο 29/8/2002, στις 18-

20/08 καταγράφηκε συνολικό ύψος βροχής 7 mm, δόθηκαν οι τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.4: Δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό των απωλειών παρεμπόδισης

Επεισόδιο	Αρχική αποθήκευση (%)	Χωρητικότητα παρεμπόδισης (mm)
1/7/2001	0	3.1
29/8/2002	10	3.1

3.2.1.4 Πρότυπο εκτίμησης άμεσης απορροής

Ο κύκλος της απορροής είναι το μέρος του υδρολογικού κύκλου που περιλαμβάνεται μεταξύ της κατακρήμνισης πάνω στο έδαφος και των αποτελεσμάτων της, δηλαδή της απορροής στους υδάτινους φορείς και της εξατμισοδιαπνοής (Μιμίκου, 2006).

Ουσιαστικά η άμεση απορροή σε μια δεδομένη λεκάνη απορροής, αποτελεί μετασχηματισμό της ενεργού βροχής, ο οποίος χαρακτηρίζεται αφενός από μια χρονική υστέρηση, λόγω του χρόνου που απαιτεί η διαδρομή του νερού μέχρι να φτάσει στην έξοδο της λεκάνης, και αφετέρου από τη διατήρηση της ολικής μάζας ή του όγκου (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η ενεργός βροχόπτωση ισούται με τη συνολική βροχόπτωση μείον τις απώλειες. Ωστόσο από αυτή τη διαδικασία δεν υπολογίζεται η χρονική κατανομή της βροχής. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα. Από τους πιο γνωστούς τρόπους προσομοίωσης της απόκρισης της λεκάνης και τους πιο πολυχρησιμοποιημένους είναι η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Τα πρότυπα που στηρίζονται στη θεωρία αυτή είναι απλά στην εφαρμογή τους και παρέχουν αρκετά καλές προσεγγίσεις των παρατηρημένων υδρογραφημάτων, εμπεριέχουν ωστόσο ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές και περιορισμούς.

Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος

Η διαδικασία εκτίμησης τόσο της πλημμυρικής αιχμής όσο και της εν γένει κατανομής της πλημμύρας που προκαλείται από μια βροχή, μπορεί να βασιστεί στο μοναδιαίο υδρογράφημα που πρώτο εισήχθη στην υδρολογική ανάλυση από τον Sherman το 1932. Ορίζεται ως το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους ίσου με τη μονάδα (στο μετρικό σύστημα ίσης με 1 cm), που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε ολόκληρη την

έκταση της υδρολογικής λεκάνης και έχει ομοιόμορφη ένταση. Δηλαδή το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι ένα υδρογράφημα απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή ίση με 10 mm συγκεκριμένης διάρκειας (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006).

Οι βασικές παραδοχές στις οποίες βασίζεται η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι:

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

Οι παραπάνω προϋποθέσεις μόνο κατά προσέγγιση ικανοποιούνται από τις φυσικές υδρολογικές λεκάνες (Wilson, 1990).

Οι δύο βασικές αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2006):

- Αρχή της αναλογίας: Δύο ενεργές βροχές ίδιας διάρκειας αλλά με διαφορετικές εντάσεις δημιουργούν υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με το λόγο των εντάσεων
- Αρχή της επαλληλίας: Το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων

Υπάρχουν τρεις τύποι συνθετικών μοναδιαίων υδρογραφημάτων (Chow et al., 1988):

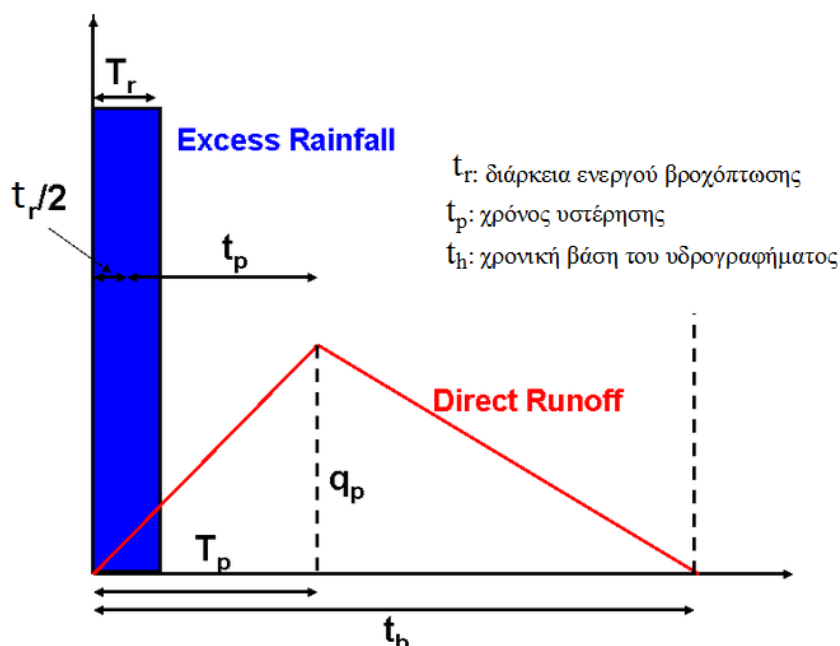
- Εκείνα που σχετίζουν τα χαρακτηριστικά του μοναδιαίου υδρογραφήματος με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder.
- Εκείνα που βασίζονται σε ένα αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το μοναδιαίο υδρογράφημα της SCS.
- Εκείνα που βασίζονται σε μια εννοιολογική λογιστική για την αποθηκευτική ικανότητα της λεκάνης. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το μοναδιαίο υδρογράφημα του Clark.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε το αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα που αναπτύχθηκε από την SCS (πλέον NRCS), με κριτήριο τα διαθέσιμα δεδομένα. Λόγω της

μελέτης σε επίπεδο επεισοδίου κρίθηκε ότι πολυπλοκότερες μέθοδοι δεν είναι κατάλληλες, ενώ τα δεδομένα (βροχοπτώσεις και απορροές) επαρκούν για την εκτίμηση των παραμέτρων της μεθόδου.

Μοναδιαίο αδιάστατο υδρογράφημα της SCS

Το αδιάστατο υδρογράφημα της SCS είναι ένα συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα στο οποίο η απορροή εκφράζεται από το λόγο της παροχής q προς την παροχή αιχμής q_p και ο χρόνος από το λόγο του χρόνου t προς το χρόνο ανόδου του μοναδιαίου υδρογραφήματος, T_p . Με δεδομένα την παροχή αιχμής και το χρόνο υστέρησης για συγκεκριμένη διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης, το μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να εκτιμηθεί από το συνθετικό αδιάστατο υδρογράφημα για μια δεδομένη λεκάνη απορροής. Οι τιμές q_p και T_p , μπορούν να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο ενός τριγωνικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (Διάγραμμα 3.4).



Διάγραμμα 3.4: Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα κατά SCS

Μετά από επεξεργασία μεγάλου αριθμού μοναδιαίων υδρογραφήματων, η SCS προτείνει ο χρόνος του καθοδικού κλάδου να προσεγγιστεί ως $1,67 T_p$. Η επιφάνεια κάτω από το μοναδιαίο υδρογράφημα πρέπει να είναι ίση με άμεση απορροή ύψους 1 cm. Η παροχή αιχμής και ο χρόνος ανόδου συνδέονται με τη σχέση:

$$q_p = \frac{CA}{T_p} \quad (3.5)$$

όπου A: το εμβαδόν τη λεκάνης απορροής

C: σταθερά μετατροπής (2,08 στο μετρικό σύστημα και 484 στο αγγλικό σύστημα)

Ο χρόνος ανόδου μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του χρόνου υστέρησης αιχμής και της διάρκειας της ενεργού βροχόπτωσης:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p \quad (3.6)$$

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες εμπειρικές προσεγγίσεις που αποσκοπούν στη συσχέτιση του χρόνου υστέρησης και του χρόνου συγκέντρωσης. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη σχέση που έχει προταθεί από την SCS είναι (NRCS, 1986):

$$t_p \cong 0,6 t_c \quad (3.7)$$

όπου t_c : ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης

Η παραπάνω σχέση αναφέρεται στις μέσες συνθήκες μιας φυσικής (αδιατάρακτης) λεκάνης, στην οποία η απορροή κατανέμεται κατά το δυνατόν πιο ομοιόμορφα.

Και για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης έχουν επινοηθεί διάφοροι εμπειρικοί τύποι. Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η σχέση υπολογισμού της SCS:

$$t_c = \frac{L^{1,15}}{7700H^{0,38}} \quad (3.8)$$

όπου t_c : ο χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης σε hr

L: το μήκος του κύριου υδατορεύματος σε ft

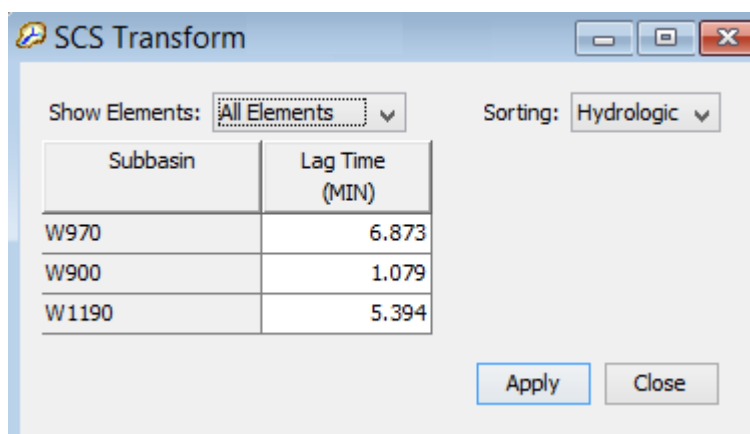
H: η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο πλέον απομακρυσμένο σημείο και στην έξοδο της λεκάνης σε ft

Από την γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση που προηγήθηκε με τη βοήθεια του HEC-GeoHMS υπολογίστηκαν οι χρόνοι υστέρησης (t_p) για όλες τις υπολεκάνες, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 3.5). Οι χρόνοι που υιοθετήθηκαν ως αρχικές τιμές, τροποποιήθηκαν στο μεταγενέστερο στάδιο της βαθμονόμησης του μοντέλου.

Πίνακας 3.5: Υπολογισμός χρόνου υστέρησης για κάθε υπολεκάνη

Υπολεκάνη	L (ft)	H (ft)	t_c (hr)	$t_p = 0,6*t_c$ (min)
W970	5397.95	911.73	0.19	6.87
W900	697.23	243.29	0.03	1.08
W1190	4173.35	791.57	0.15	5.39

Η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα γίνεται μέσω των εντολών Parameters>> Transform >> SCS Unit Hydrograph (Εικόνα 3.16).



Εικόνα 3.16: Χρόνοι υστέρησης αιχμής σε περιβάλλον HEC-HMS

3.2.1.5 Πρότυπο εκτίμησης βασικής απορροής

Το επόμενο μέγεθος το οποίο επίσης μοντελοποιείται από το λογισμικό είναι η βασική απορροή. Για το συνυπολογισμό, με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, της συμβολής της βασικής απορροής σε ένα υδρογράφημα είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός της από τη συνολική απορροή. Στην πράξη ένας τέτοιος διαχωρισμός παρουσιάζει πολλά προβλήματα στο να καθοριστούν με ακρίβεια οι ποσότητες που προέρχονται από τις παραπάνω διαδικασίες.

Στο διάστημα μεταξύ των πλημμυρικών επεισοδίων η βασική ροή μειώνεται με πολύ ήπιο (πρακτικά ανεπαίσθητο) ρυθμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφανειακή εκφόρτιση των υπόγειων υδροφορέων συνοδεύεται από ταπείνωση της στάθμης τους και, συνακόλουθα, μείωση του ρυθμού εκφόρτισης. Ο κλάδος στείρευσης της βασικής ροής μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά από μια σχέση εκθετικής μείωσης της παροχής ως προς το χρόνο. Με τη συμβολή της άμεσης απορροής (που προφανώς εμφανίζεται με κάποια υστέρηση σε σχέση με την έναρξη της βροχής) η παροχή αυξάνει και μάλιστα απότομα, στις

περισσότερες περιπτώσεις. Αντίθετα, η λήξη της πλημμύρας είναι πιο δύσκολο να προσδιοριστεί, καθώς στον καθοδικό κλάδο συμβάλλουν τόσο η βασική ροή όσο και η υποδερμική που, συμβατικά, θεωρείται συνιστώσα της άμεσης απορροής. Κατά τη διάρκεια της πλημμύρας, η διάκριση μεταξύ των δύο αυτών τύπων ροής είναι εξαιρετικά ασαφής (Ευστρατιάδης κ.ά., 2012).

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, αντί της φυσικής ερμηνείας, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μαθηματικές προσεγγίσεις, που στηρίζονται στον εντοπισμό του σημείου καμπής του υδρογραφήματος.

Για την αναπαράσταση της βασικής απορροής επιλέχθηκε να εφαρμοστεί το πρότυπο εκθετικής μείωσης (recession), διότι οι βασική απορροή μεταβάλλεται στη διάρκεια του επεισοδίου και, επιπλέον, οι δύο παράμετροι που περιλαμβάνει προσδιορίζονται σχετικά απλά από τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα. Περιγράφεται από την εξίσωση:

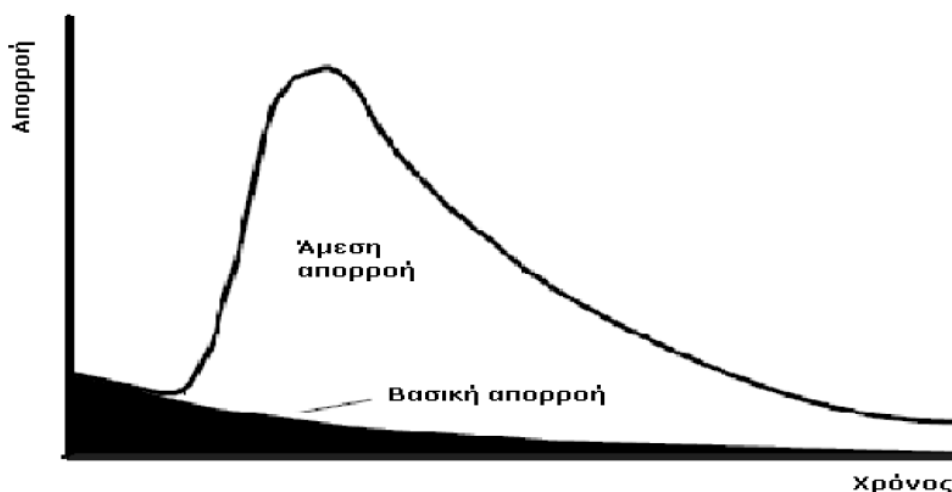
$$Q_t = Q_0 k^t \quad (3.9)$$

όπου Q_0 : η βασική ροή στην αρχή της προσομοίωσης

Q_t : η βασική ροή σε χρόνο t

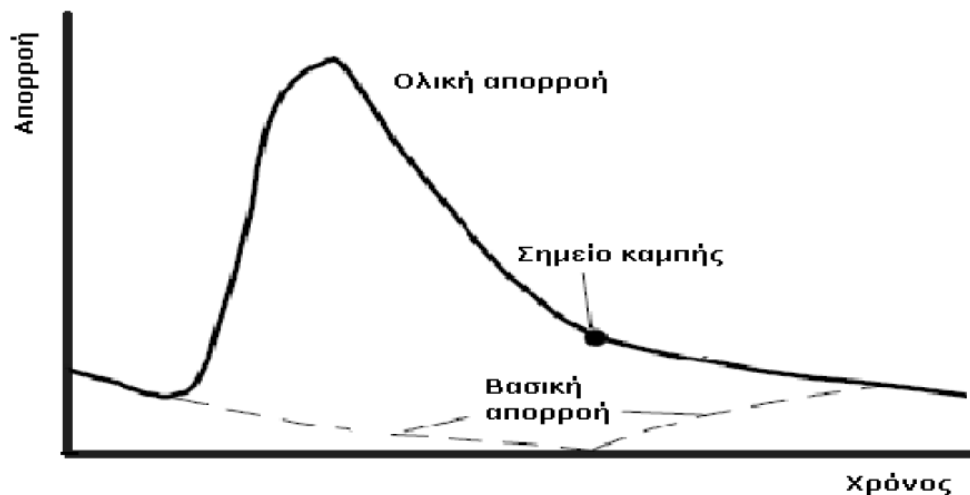
k : μια σταθερά εκθετικής μείωσης (ορίζεται ως ο λόγος της βασικής ροής την στιγμή t προς την βασική ροή πριν από μια μέρα)

Μία βασική ροή υπολογισμένη με τον παραπάνω τύπο φαίνεται στο Διάγραμμα 3.5.



Διάγραμμα 3.5: Αρχική εκθετική μείωση βασικής απορροής

Η εξίσωση 3.9 περιγράφει τη βασική ροή από την έναρξη της προσομοίωσης μέχρι και τη χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο σημείο καμπής του υδρογραφήματος, καθώς η υστερημένη υπόγεια ροή φτάνει τα κανάλια της λεκάνης (Διάγραμμα 3.6). Από τη στιγμή αυτή και μέχρι το τέλος της προσομοίωσης η ολική απορροή υπολογίζεται από την εξίσωση 3.9, ενώ η βασική απορροή ορίζεται ως η διαφορά της ολικής μείον την άμεση απορροή. Όταν η άμεση απορροή γίνει μηδέν τότε η ολική και η βασική απορροή ταυτίζονται (Feldman, 2000, Καψάλης, 2009).



Διάγραμμα 3.6: Αναπαράσταση βασικής απορροής με το πρότυπο εκθετικής μείωσης του HEC-HMS

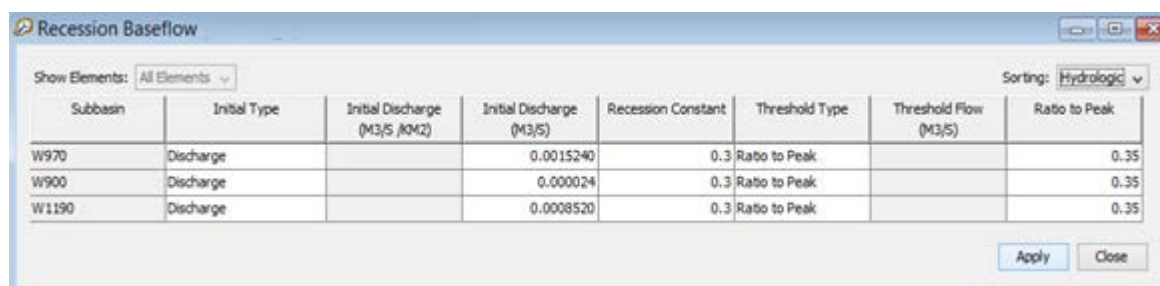
Πέρα από την παροχή Q_0 που αποτελεί μια αρχική συνθήκη του μοντέλου, πρέπει να προσδιοριστούν άλλες δύο παράμετροι. Η πρώτη παράμετρος είναι η σταθερά εκθετικής μείωσης k , η οποία μπορεί να πάρει τιμές από 0,00011 έως 1. Τιμές κοντά στη μονάδα συνεπάγονται ήπια κλίση της καμπύλης βασικής απορροής, ενώ μικρές τιμές απότομη κλίση. Στην παρούσα εργασία εκτιμήθηκε βιβλιογραφικά (Pilgrim and Cordery, 1992). Η δεύτερη παράμετρος αφορά τον προσδιορισμό του σημείου καμπής του υδρογραφήματος. Στην προκειμένη επιλέχθηκε ο λόγος απορροής προς την αιχμή (ratio to peak).

Από τη στιγμή που διαθέσιμο πλημμυρογράφημα έχουμε μόνο στη έξοδο της λεκάνης απορροής, οι αρχικές τιμές της μεθόδου βασικής απορροής είναι ίδιες για όλες τις υπολεκάνες και αλλάζουν σύμφωνα με τις μετρήσεις που υπάρχουν ανά επεισόδιο όπως απεικονίζονται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6: Παράμετροι υπολογισμού βασικής απορροής

Επεισόδιο	Q_0 (m ³ /sec)	Σταθερά εκθετικής μείωσης k	Λόγος απορροής προς αιχμή
1/7/2001	0.002	0.3	0.35
29/8/2002	0.002	0.3	0.43

Τα παραπάνω εισάγονται στο HEC-HMS από το μενού: Parameters>> Baseflow>> Recession (Εικόνα 3.17).



Εικόνα 3.17: Εισαγωγή δεδομένων προτύπου βασικής απορροής στο HEC-HMS

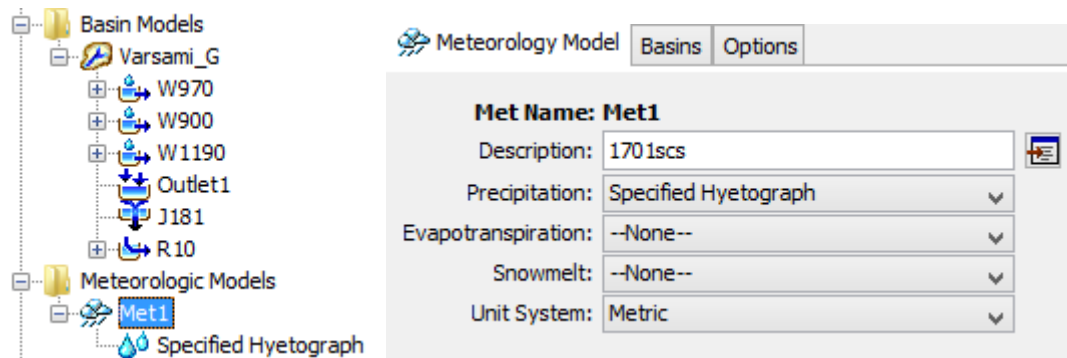
3.2.1.6 Πρότυπο διόδευσης πλημμύρας

Λόγω του μικρού μεγέθους του υδατορεύματος, αλλά και λόγω έλλειψης δεδομένων, αποφασίσθηκε η μη ενσωμάτωση του προτύπου διόδευσης στο υδρολογικό μοντέλο.

3.2.2 Μετεωρολογικό μοντέλο

Στο κομμάτι αυτό του προγράμματος γίνεται η χωροχρονική κατανομή της μετεωρολογικής πληροφορίας στη λεκάνη. Για την κατανομή των παρατηρημένων και καταγεγραμμένων επεισοδίων βροχής στην λεκάνη το λογισμικό παρέχει εναλλακτικές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με το σκοπό της εργασίας και τον τύπο των δεδομένων που έχουμε στη διάθεσή μας. Στην προκειμένη εργασία χρησιμοποιήθηκαν παρατηρημένα υετογραφήματα (specified hyetographs) με δεδομένα από ένα μόνο βροχογράφο, ο οποίος θεωρείται αντιπροσωπευτικός για όλη τη λεκάνη. Με τη μέθοδο αυτή δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει την ακριβή χρονοσειρά για την κατάρτιση του υετογραφήματος στις υπολεκάνες (Εικόνα 3.18).

Η δημιουργία του μετεωρολογικού μοντέλου πραγματοποιείται με την επιλογή Components>> Meteorologic Manager.



Εικόνα 3.18: Δημιουργία μετεωρολογικού μοντέλου στο HEC-HMS

3.2.3 Χρονοσειρές δεδομένων

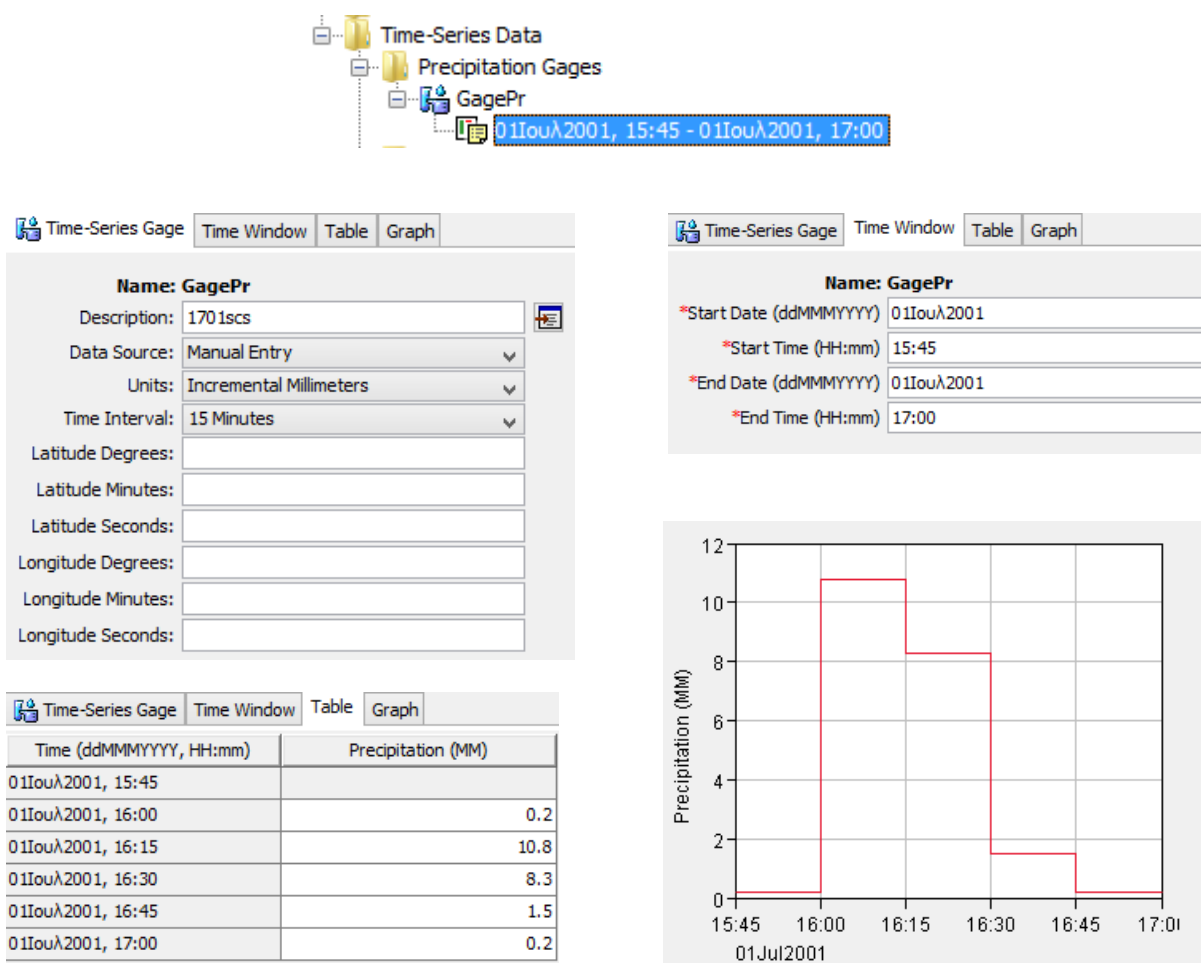
Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο στάδιο της εργασίας τα βροχομετρικά και σταθμηγραφικά δεδομένα παραχωρήθηκαν από το ΙΜΔΟ&ΤΔΠ, υπό μορφή μετρητικών ταινιών. Δεδομένου ότι αποτελούν πρωτογενή δεδομένα στα οποία στηρίζεται όλη η μεθοδολογία για την προσομοίωση υδρολογικών διαδικασιών, καταβλήθηκε μεγάλη προσπάθεια για την επίτευξη όσο το δυνατόν ακριβέστερης ανάλυσής τους με χρονικό βήμα 15 min. Όσον αφορά στην επιλογή τους, επιδιώχθηκε τα επεισόδια να είναι μεμονωμένα, να μην υπάρχουν δηλαδή έντονες βροχοπτώσεις λίγες μέρες πριν και μετά το επιλεγμένο επεισόδιο, καθώς και να αφορούν διαφορετικές περιόδους κατά τη διάρκεια του έτους, ώστε να είναι εμφανείς τυχόν διαφορές στα αποτελέσματα λόγω των διαφορετικών μετεωρολογικών και περιβαλλοντολογικών συνθηκών. Τα επεισόδια που συνολικά χρειαζόμαστε απαραίτητως είναι 3, τα δύο αφορούν στην βαθμονόμηση και το τρίτο στην επαλήθευση. Για τους παραπάνω λόγους καταλήξαμε στα ακόλουθα επεισόδια βροχόπτωσης:

- 1 Ιουλίου 2001 (βαθμονόμηση)
- 29 Αυγούστου 2002 (βαθμονόμηση)
- 24 Οκτωβρίου 2003 (επαλήθευση)

3.2.3.1 Βροχομετρικά δεδομένα

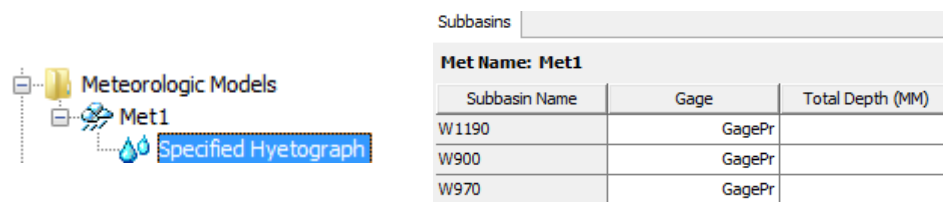
Στην παρούσα εργασία οι μετρήσεις ύψους βροχής προέρχονται από βροχογράφο, ο οποίος είναι εγκατεστημένος σε απόσταση 70 m από την έξοδο της λεκάνης. Επόμενο βήμα αποτελεί η εισαγωγή των χρονοσειρών βροχόπτωσης στο HEC-HMS μέσω των εντολών Components>> Time-Series Data Manager>> Data Type: Precipitation Gages. Δημιουργείται, έτσι, μια βάση στην οποία συμπληρώνονται τα εξής στοιχεία (Εικόνα 3.19):

- **Time-Series Gage:** Ορισμός παραμέτρων με βάση τα χαρακτηριστικά των δεδομένων βροχόπτωσης (χρονικό βήμα, μονάδα μέτρησης), καθώς και του τρόπου εισαγωγής του επεισοδίου βροχής
- **Time window:** Καθορισμός της διάρκειας του επεισοδίου βροχής
- **Table:** Εισαγωγή δεδομένων χρονοσειράς
- **Graph:** Υετόγραμμα σχεδιασμού



Εικόνα 3.19: Διαδικασία εισαγωγής επεισοδίου βροχής στο HEC-HMS

Πρέπει να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι για να δεχθεί το μετεωρολογικό αρχείο τα βροχομετρικά δεδομένα γίνεται αντιστοίχιση αυτών σε κάθε μία υπολεκάνη.

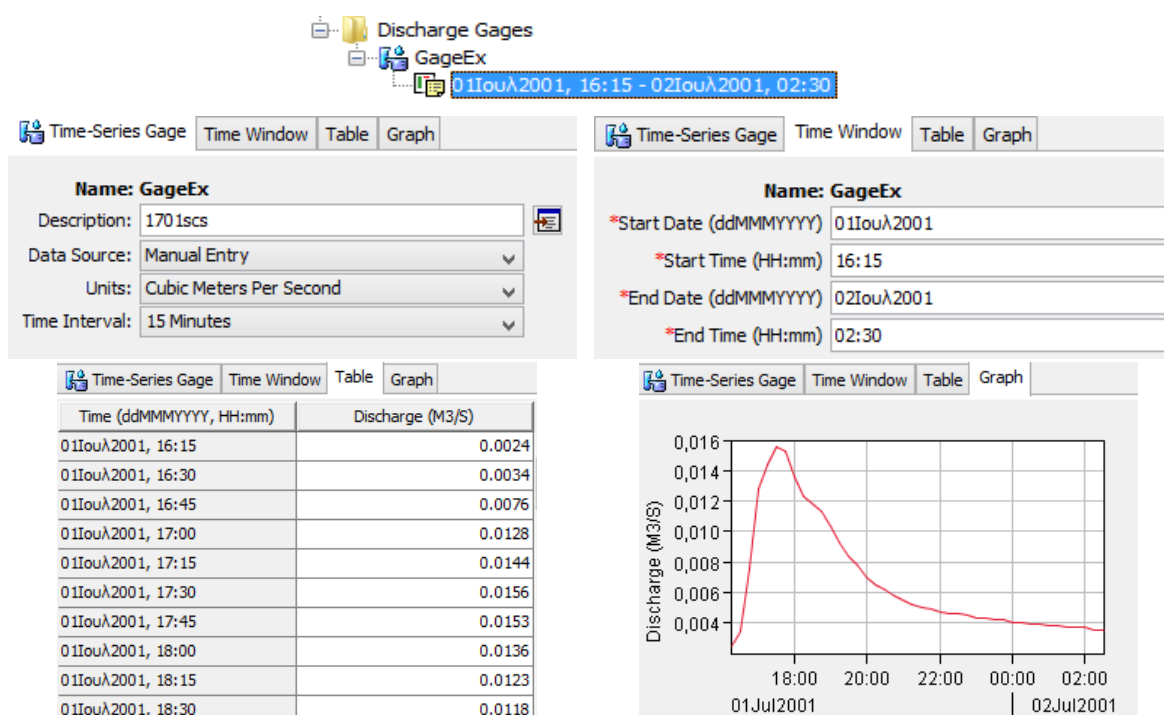


Εικόνα 3.20: Σύνδεση των χρονοσειρών βροχόπτωσης με τις υπολεκάνες μέσω του μετεωρολογικού μοντέλου

3.2.3.2 Δεδομένα παροχών

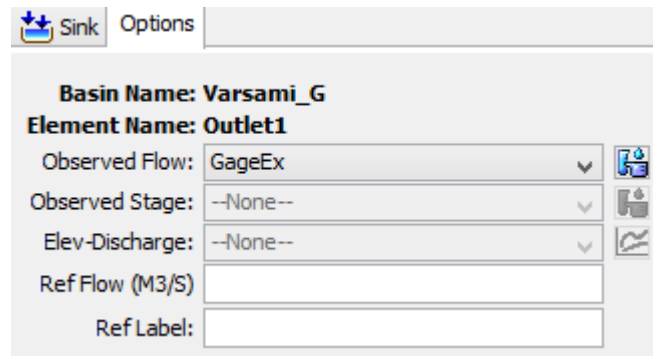
Στην έξοδο της υπό μελέτη λεκάνης που βρίσκεται στην θέση Ρέματα, είναι εγκατεστημένος υδρομετρικός σταθμός εξοπλισμένος με σταθμηγράφο από όπου και συλλέχθηκαν τα δεδομένα στάθμης. Τα δεδομένα παροχής για κάθε επεισόδιο προέκυψαν από τις τιμές της στάθμης, μετά την εφαρμογή της εξίσωσης στάθμης-παροχής για τον τριγωνικό εκχειλιστή που υπάρχει στον υδρομετρικό σταθμό. Παρατηρημένες παροχές σε άλλη θέση δεν υπάρχουν.

Για την εισαγωγή των χρονοσειρών των παροχών στο HEC-HMS ακολουθείται η ίδια ακριβώς διαδικασία όπως και στις χρονοσειρές βροχόπτωσης (Εικόνα 3.21). Επιλέγοντας Components>> Time-Series Data Manager>> Data Type: Discharge Gages.



Εικόνα 3.21: Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων παροχών στο HEC-HMS

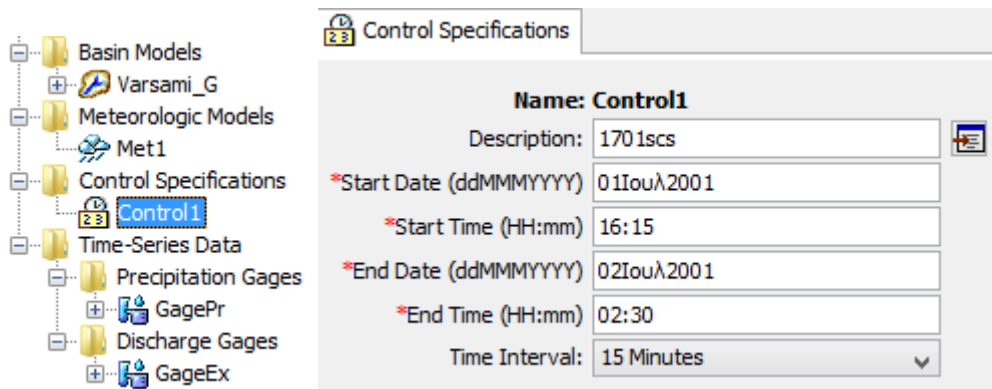
Στη συνέχεια τα δεδομένα αυτά πρέπει να αντιστοιχιστούν με τη έξοδο της λεκάνης.



Εικόνα 3.22: Αντιστοίχιση παρατηρημένων παροχών με την έξοδο της λεκάνης απορροής

3.2.4 Χρονικός έλεγχος προσομοίωσης

Στην τελευταία φάση πριν την εκτέλεση των υπολογισμών της υδρολογικής προσομοίωσης, το HEC-HMS ζητά από το χρήστη να καθορίσει την έναρξη και τη λήξη του επεισοδίου καθώς και το χρονικό βήμα των υπολογισμών. Η διαδικασία αυτή εκτελείται μέσω της εντολής Components>> Control Specifications Manager.



Εικόνα 3.23: Παράθυρο εισαγωγής χρονικών ορίων της υδρολογικής προσομοίωσης

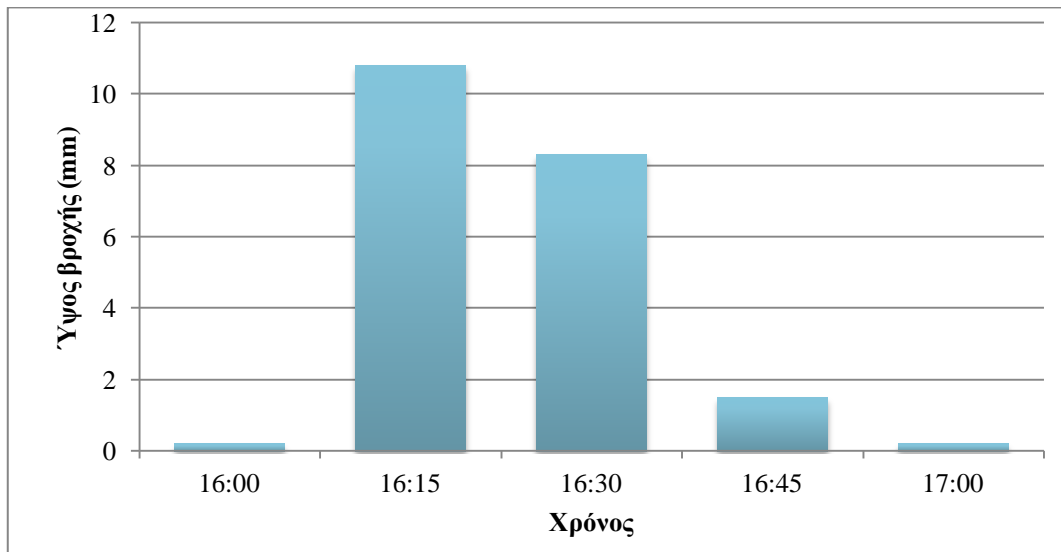
4. Αποτελέσματα βαθμονόμησης και επαλήθευσης

4.1 Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης

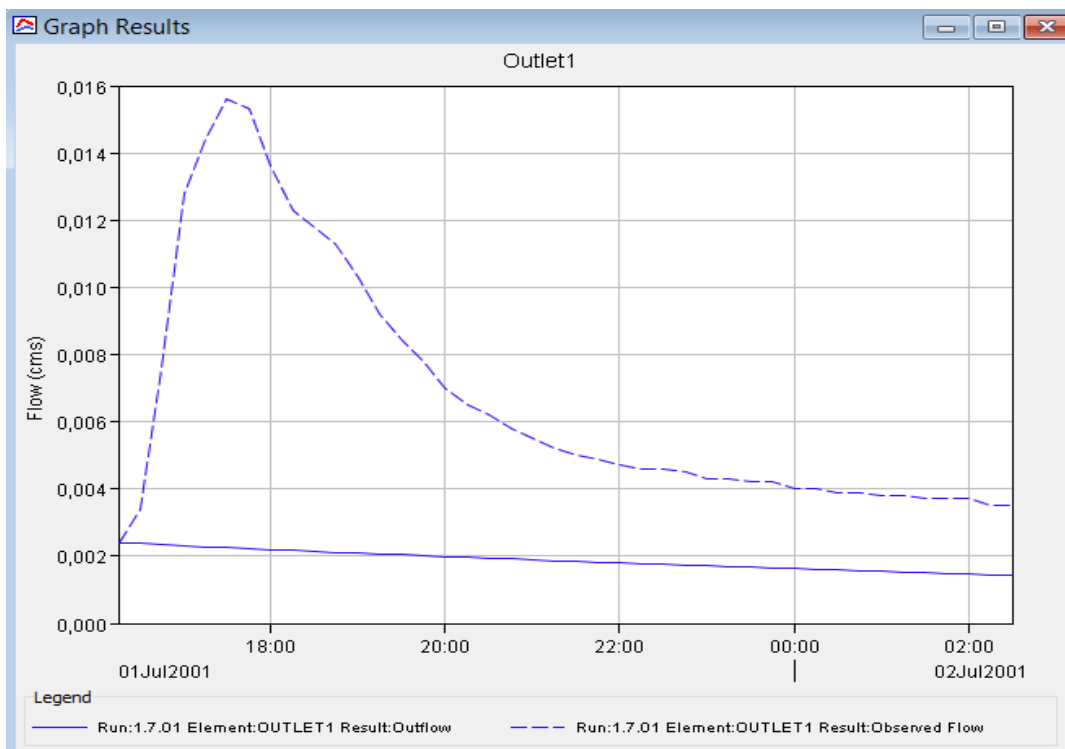
Μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των δεδομένων ακολουθεί η εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου μέσω της εντολής Compute Run και εφόσον ο χρήστης εισάγει το μοντέλο λεκάνης απορροής, το μετεωρολογικό μοντέλο και το αρχείο του χρονικού ελέγχου της προσομοίωσης. Μια πληθώρα αποτελεσμάτων παρέχεται σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων, ενώ δίνεται η δυνατότητα επισκόπησης των αποτελεσμάτων της υδρολογικής προσομοίωσης για κάθε υπολεκάνη αλλά και για κάθε τμήμα ποταμού. Παράγονται υδρογραφήματα της λεκάνης, διαγράμματα και πίνακες βροχόπτωσης, απωλειών, απορροής κλπ.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται, και για τα δύο επεισόδια που προσομοιώθηκαν (1/7/2001 και 29/8/2002), τα διαγράμματα ύψους βροχής με βήμα 15 min και τα αντίστοιχα πλημμυρογραφήματα, στην έξοδο της λεκάνης (θέση Ρέματα) που προέκυψαν από την εκτέλεση του μοντέλου. Παρατηρώντας τα Διαγράμματα 4.2 και 4.4 είναι προφανές ότι, για τις αρχικές υποθέσεις που έγιναν, υπάρχει μεγάλη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των παρατηρημένων πλημμυρογραφημάτων και υποεκτίμηση όλων των πλημμυρικών μεγεθών, αφού στην ουσία δεν προκύπτει επιφανειακή απορροή από τα αποτελέσματα του μοντέλου. Ωστόσο, για λόγους σύγκρισης με το βαθμονομημένο μοντέλο παρατίθενται τα αποτελέσματα της πρώτης αυτής προσομοίωσης.

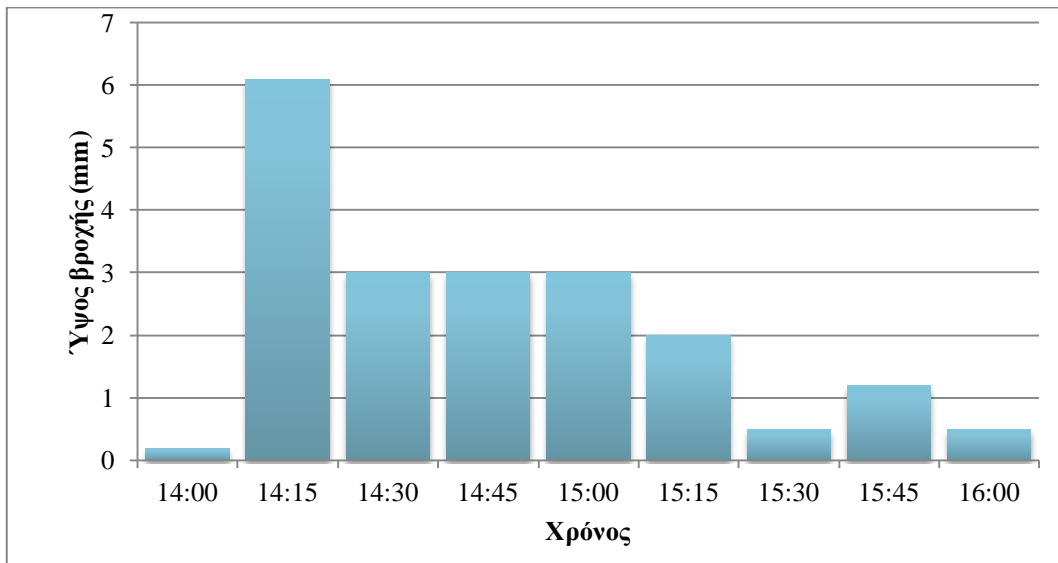
Γίνεται σαφές ότι το μοντέλο πριν τη βαθμονόμηση και, παρά τη σχετική εκτίμηση των αρχικών τιμών των παραμέτρων εισαγωγής, δεν δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα. Εντούτοις, η εκτεταμένη ενασχόληση για την εκτίμηση αυτών των τιμών έχει σημασία κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης και την ορθή αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της.



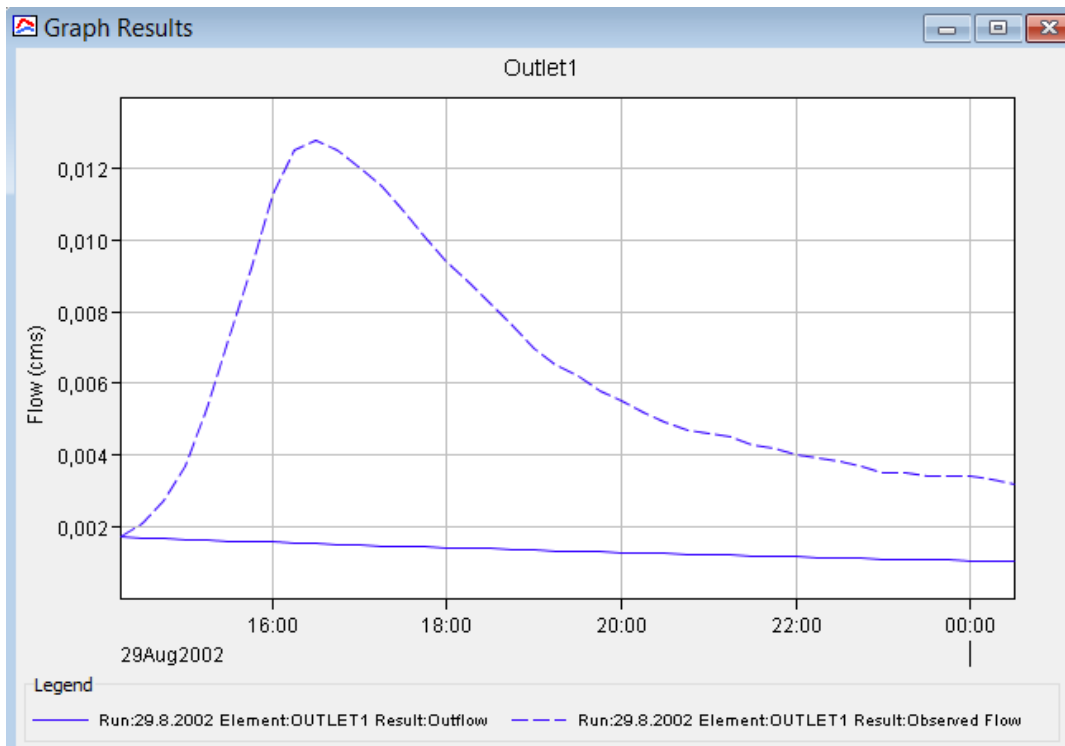
Διάγραμμα 4.1: Διάγραμμα εξέλιξης επεισοδίου βροχής 1/7/2001



Διάγραμμα 4.2: Επεισόδιο 1/7/2001 - Αποτελέσματα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου



Διάγραμμα 4.3: Διάγραμμα εξέλιξης επεισοδίου βροχής 29/8/2002



Διάγραμμα 4.4: Επεισόδιο 29/8/2002 - Αποτελέσματα προσομοίωσης με τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου

4.2 Βαθμονόμηση

Η αξιοπιστία του υδρολογικού μοντέλου εξαρτάται σε πολύ σημαντικό βαθμό από την ποιότητα της βαθμονόμησης (calibration), μέσω της οποίας εκτιμούνται έμμεσα οι παράμετροί του. Πρόκειται για μια διαδικασία αξιολόγησης εναλλακτικών συνδυασμών και συνεχούς προσαρμογής των τιμών των υδρολογικών μεταβλητών, που πραγματοποιείται συγκρίνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις της λεκάνης με τις παρατηρημένες και επιλέγοντας το συνδυασμό με την καλύτερη προσαρμογή. Μια βαθμονόμηση κρίνεται επιτυχής εφόσον στις βαθμονομημένες τιμές μπορεί να αποδοθεί φυσικό νόημα και το μοντέλο παρουσιάζει επαρκή προγνωστική ικανότητα, δηλαδή μπορεί να αναπαράγει ικανοποιητικά όλο το φάσμα των αποκρίσεων μιας λεκάνης.

Το πρόγραμμα HEC-HMS διαθέτει εργαλεία αυτοματοποιημένης ρύθμισης του υδρολογικού μοντέλου. Με βάση αλγόριθμους βελτιστοποίησης και αντικειμενικές συναρτήσεις υπολογισμού σφαλμάτων, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει αυτόματα τις παραμέτρους μέσω επαναληπτικών διαδικασιών που απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα. Ωστόσο κατά την προσπάθεια αξιοποίησης αυτής της δυνατότητας, μετά από εκτεταμένες δοκιμές, διαπιστώθηκε ότι οι βελτιστοποιημένες παράμετροι δεν ήταν συμβατές με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος. Λόγω των μη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου, εφαρμόστηκε, εν τέλει η τεχνική της εμπειρικής-χειροκίνητης βαθμονόμησης. Η εν λόγω διαδικασία ενσωματώνει την υδρολογική εμπειρία, οδηγώντας έτσι σε τιμές παραμέτρων που είναι πιο ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης (Ευστρατιάδης, 2008).

4.2.1 Διαδικασία βαθμονόμησης

Η μέθοδος της βαθμονόμησης εφαρμόστηκε με βάση τα γεγονότα βροχόπτωσης της 1/7/2001 και της 29/8/2002. Οι παράμετροι που ρυθμίστηκαν στο παρόν μοντέλο είναι ο αριθμός καμπύλης CN και ο λόγος Ia/S του προτύπου απωλειών κατά SCS, με αποτέλεσμα να μεταβληθούν και οι αρχικές απώλειες για κάθε υπολεκάνη, ο χρόνος υστέρησης της αιχμής (lag time) του μοναδιαίου υδρογραφήματος της SCS και η αναλογία ως προς την παροχή αιχμής στο πρότυπο βασικής απορροής.

Η διαδικασία προσαρμογής κατά την εμπειρική βαθμονόμηση βασίζεται στην τεχνική της δοκιμής-σφάλματος, η οποία πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την απόδοση φυσικού

νοήματος στις βαθμονομημένες τιμές των παραμέτρων. Αρχικά έγινε προσπάθεια να διαπιστωθούν οι μεταβολές που προκαλεί κάθε μία από τις παραμέτρους στο πλημμυρογράφημα. Στη συνέχεια, με δοκιμές μεταβολής διαφόρων συνδυασμών παραμέτρων, η βαθμονόμηση ελέγχθηκε πρωτίστως χρησιμοποιώντας ως μέτρο σφάλματος το συντελεστή προσδιορισμού (coefficient of determination), που αποτελεί το τυπικό μέτρο καλής προσαρμογής υδρολογικών μοντέλων (Nash and Sutcliffe, 1970). Αναφέρεται και ως δείκτης Nash-Sutcliffe και ορίζεται:

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.1)$$

όπου x_i : η παρατηρημένη χρονοσειρά απορροής

\bar{x} : η μέση τιμή της

y_i : η προσομοιωμένη χρονοσειρά απορροής

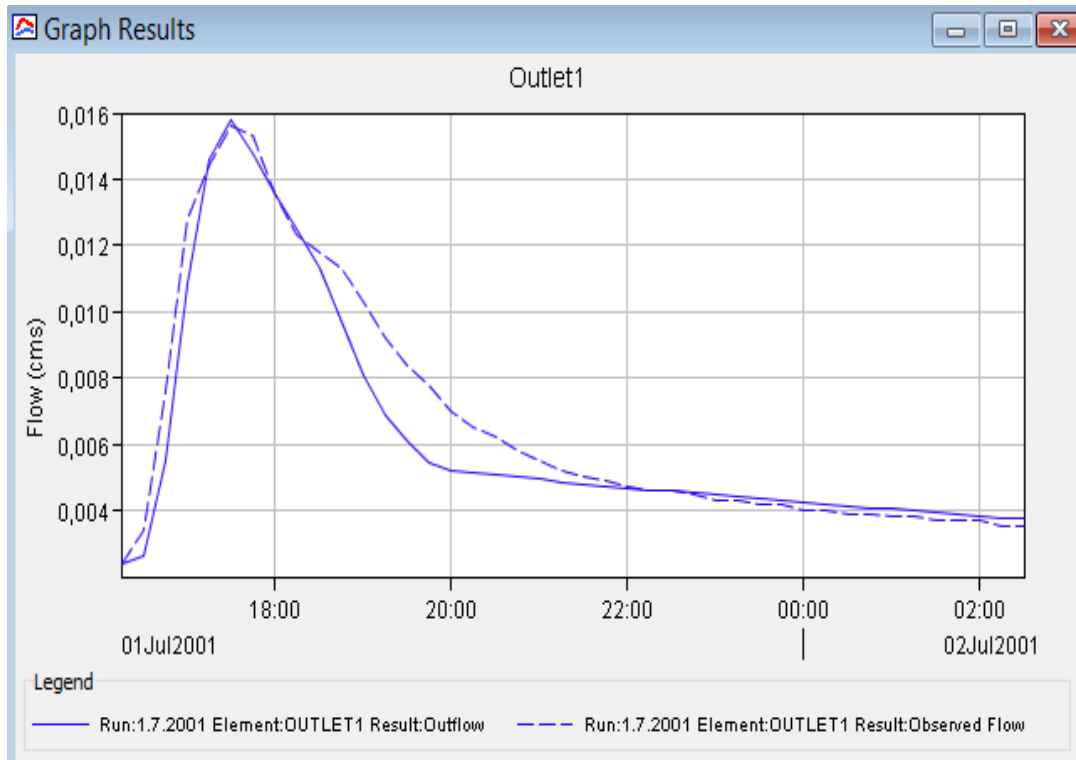
n : το μέγεθος της χρονοσειράς

Ο συντελεστής προσδιορισμού λαμβάνει τιμές από $-\infty$ έως 1.

- Αν $R = 1$ υπάρχει απόλυτη ταύτιση της παρατηρημένης με την προσομοιωμένη χρονοσειρά.
- Αν $R < 1$, η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται πολύ κακή, καθώς η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι χειρότερη εκτιμήτρια σε σχέση με την παρατηρημένη τιμή \bar{x} .

Η μηδενική τιμή υποδεικνύει ότι ο προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι τόσο ακριβής όσο και η μέση τιμή των παρατηρημένων τιμών. Επομένως, όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή του συντελεστή R , τόσο καλύτερη είναι η προσαρμογή του μοντέλου.

4.2.2 Αποτελέσματα βαθμονόμησης

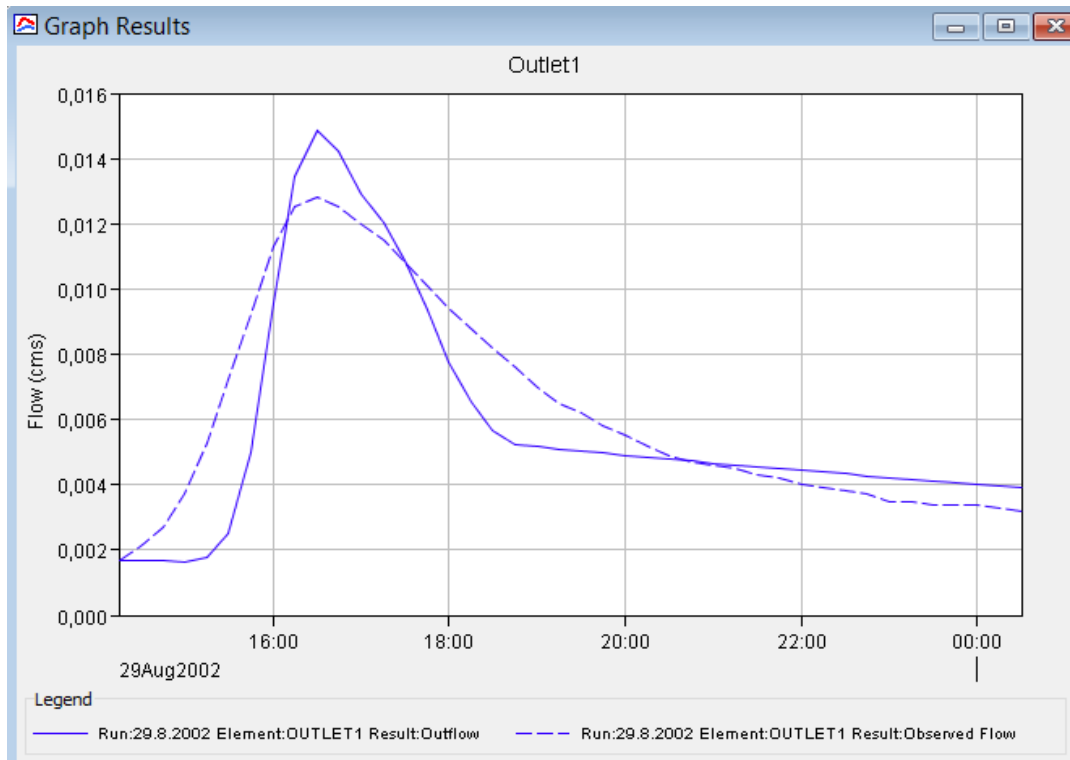


Διάγραμμα 4.5: Επεισόδιο 1/7/2001 - Σύγκριση παρατηρημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος

Πίνακας 4.1: Επεισόδιο 1/7/2001 - Βαθμονομημένες τιμές υδρολογικών παραμέτρων

ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 1/7/2001				
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΑ (SCS-CN)		ΑΜΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ (SCS UH)	ΒΑΣΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ (RECESSION)
	CN	Ia/S	Lag Time (min)	Ratio to Peak
W970	74	0.05	80	0.28
W900	74	0.05	10	0.28
W1190	74	0.05	35	0.28
<u>Nash-Sutcliffe: 0.92</u>				

Ο συνολικός όγκος απορροής του βαθμονομημένου υδρογραφήματος είναι μικρότερος κατά 8,2% σε σχέση με το παρατηρημένο, ενώ η παροχή αιχμής είναι μεγαλύτερη κατά 1,3%.



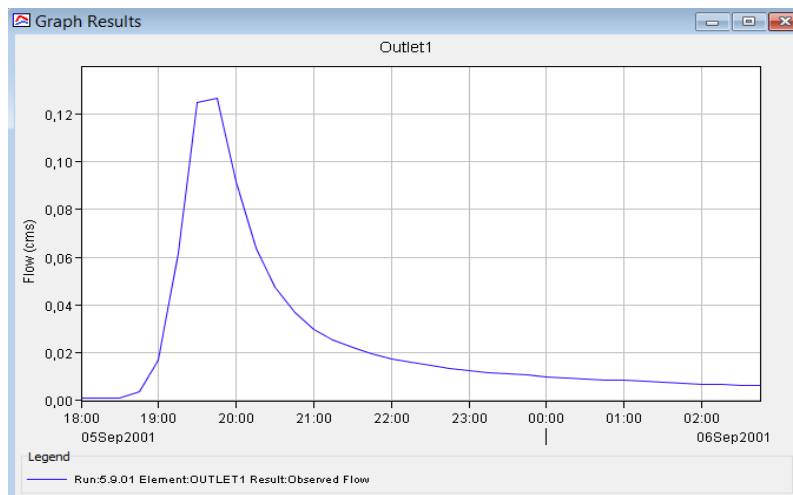
Διάγραμμα 4.6: Επεισόδιο 29/8/2002 - Σύγκριση παρατηρημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος

Πίνακας 4.2: Επεισόδιο 29/8/2002 - Βαθμονομημένες τιμές υδρολογικών παραμέτρων

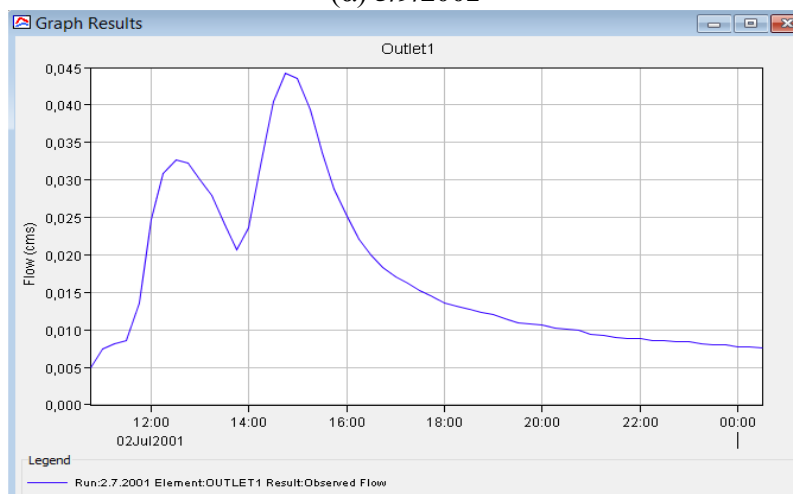
ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 29/8/2002				
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΑ (SCS-CN)		ΑΜΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ (SCS UH)	ΒΑΣΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ (RECESSION)
	CN	Ia/S	Lag Time (min)	Ratio to Peak
W970	67	0.06	80	0.3
W900	67	0.06	10	0.3
W1190	67	0.06	35	0.3
Nash-Sutcliffe: 0.8				

Ο συνολικός όγκος απορροής του βαθμονομημένου υδρογραφήματος είναι μικρότερος κατά 8,8% σε σχέση με το παρατηρημένο, ενώ η παροχή αιχμής είναι μεγαλύτερη κατά 16,4%.

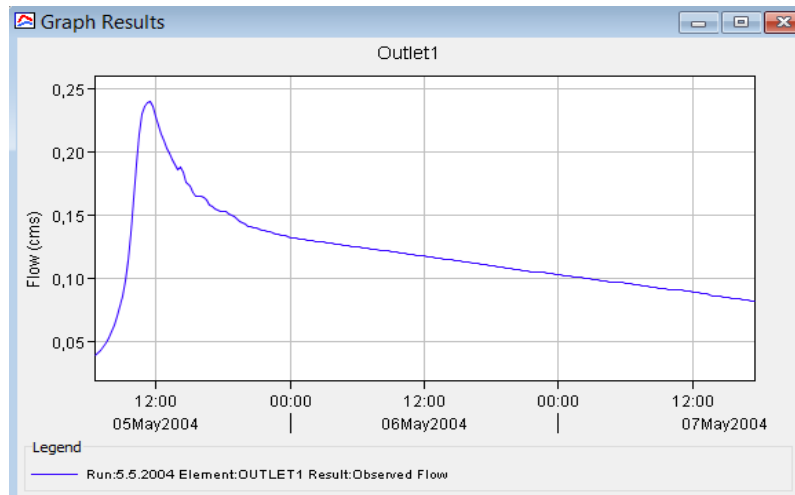
Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια αυτής της εργασίας προσομοιώθηκαν επιπλέον τρία επεισόδια. Η ένταξη τους όμως στην ομάδα επιλογής των βαθμονομημένων επεισοδίων είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής επίδοσης του υδρολογικού μοντέλου (ετεροχρονισμένες παροχές αιχμής καθώς και αποκλίσεις στους συνολικούς όγκους απορροής). Οι λόγοι για τους οποίους αυτά τα επεισόδια δεν συμπεριλήφθηκαν στην υδρολογική ανάλυση, παρά την απόκτηση εμπειρίας που προσέφεραν, είναι ότι παρουσίαζαν ιδιαίζοντα χαρακτηριστικά (διπλές αιχμές, χρονική απόκλιση μεγίστων βροχής και παρατηρημένης παροχής που διέφερε για κάθε επεισόδιο), τα οποία μεμονωμένα ήταν δυνατό να ελεγχθούν, ωστόσο στο σύνολο των επεισοδίων επηρέαζαν την προσομοιωμένη υδρολογική εικόνα της λεκάνης, αποδίδοντας της μη αναμενόμενα χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα και για τα επεισόδια αυτά.



(α) 5/9/2001



(β) 2/7/2001



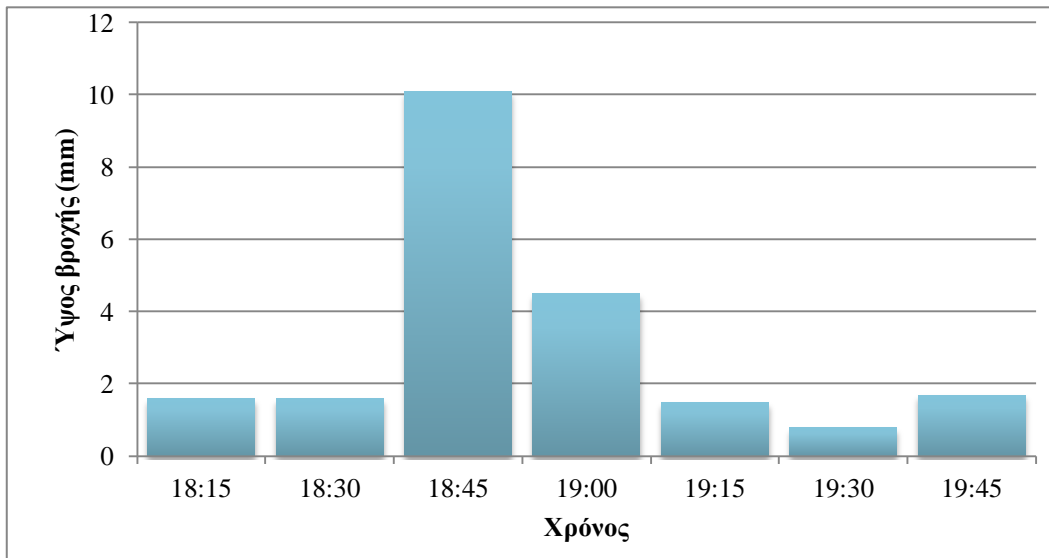
(γ) 5/5/2004

Διάγραμμα 4.7: (α),(β),(γ) Παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα επεισοδίων που δεν συμπεριλήφθηκαν στην υδρολογική ανάλυση

4.3 Επαλήθευση

Ο όρος επαλήθευση (validation) αναφέρεται σε μια διαδικασία αξιολόγησης μαθηματικών μοντέλων, ώστε να διαπιστωθεί αν αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του συστήματος που προσομοιώνουν. Συνήθως, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από τη βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη (κατά κανόνα μεταγενέστερη της βαθμονόμησης) χρονική περίοδο, για την οποία επίσης διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της λεκάνης (Ευστρατιάδης, 2008).

Η επαλήθευση του μοντέλου έγινε με το γεγονός βροχόπτωσης που πραγματοποιήθηκε στις 24/10/2003. Εξήχθησαν οι μέσοι όροι των υδρολογικών παραμέτρων που βαθμονομήθηκαν για τα επεισόδια στις 1/7/2001 και 29/8/2002 και, εν συνεχεία, αποτέλεσαν δεδομένα εισόδου για το επεισόδιο επαλήθευσης στις 24/10/2003, ώστε να ελεγχθεί η απόδοση του μοντέλου. Για την αξιολόγηση της επαλήθευσης χρησιμοποιήθηκε ως κριτήριο ελέγχου ο δείκτης Nash-Sutcliffe, όπως και στη βαθμονόμηση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται, τα διαγράμματα ύψους βροχής με βήμα 15 min για το επεισόδιο επαλήθευσης.



Διάγραμμα 4.8: Διάγραμμα εξέλιξης επεισοδίου βροχής 24/10/2003

4.3.1 Προετοιμασία επαλήθευσης

Πίνακας 4.3: Μέσος όρος βαθμονομημένων παραμέτρων προτύπου υδρολογικών απωλειών

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΑ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΑ (SCS-CN)		
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia/S
W970	71	0.06
W900	71	0.06
W1190	71	0.06

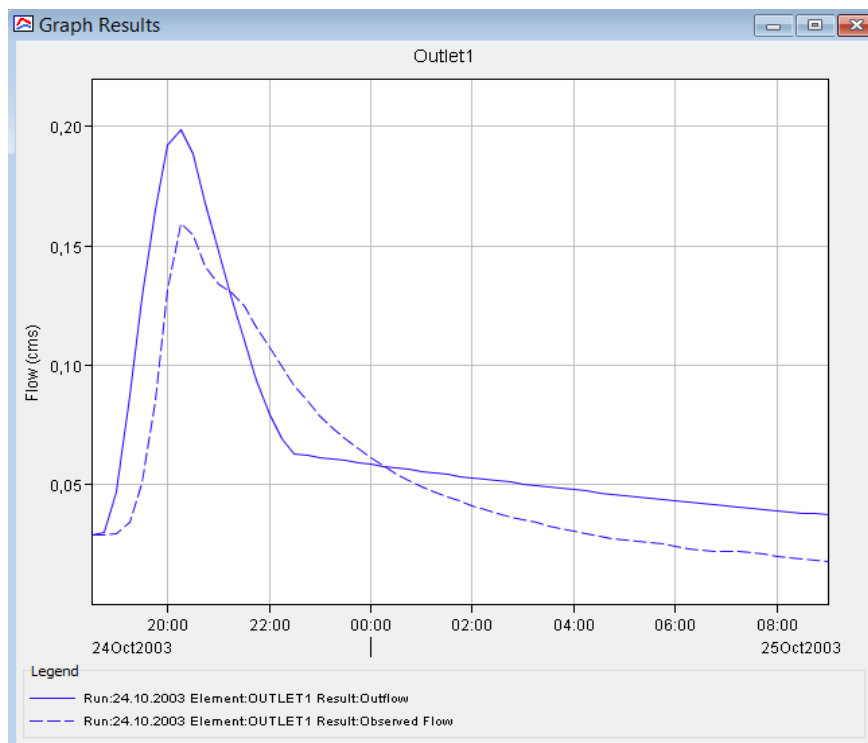
Πίνακας 4.4: Μέσος όρος βαθμονομημένων τιμών χρόνου υστέρησης

ΑΜΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ (SCS UH)	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	Lag Time (min)
W970	80
W900	10
W1190	35

Πίνακας 4.5: Μέσος όρος βαθμονομημένων τιμών λόγου απορροής προς αιχμή

ΒΑΣΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ (RECESSION)	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	Ratio to Peak
W970	0.29
W900	0.29
W1190	0.29

4.3.2 Αποτελέσματα επαλήθευσης



Διάγραμμα 4.9: Επεισόδιο 24/10/2003 - Σύγκριση πλημμυρογραφήματος επαλήθευσης και παρατηρημένου

Στον Πίνακα 4.6 παρατίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά υδρολογικά μεγέθη των πλημμυρογραφημάτων, όσον αφορά το επεισόδιο της 24/10/2003, καθώς και το αποτέλεσμα του ελέγχου επίδοσης της διαδικασίας με το δείκτη Nash-Sutcliffe.

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα επαλήθευσης επεισοδίου 24/10/2003

ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 24/10/2003		
	ΠΑΡΑΤΗΡΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ	ΕΠΑΛΗΘΕΥΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ
ΠΛ. ΑΙΧΜΗ (m³/s)	0.16	0.2
ΩΡΑ ΑΙΧΜΗΣ	24/10/2003, 20:15	24/10/2003, 20:15
ΠΛ. ΟΓΚΟΣ (m³)	2888	3542
<u>Nash-Sutcliffe: 0.6</u>		

Παρατηρείται υπερεκτίμηση του πλημμυρικού όγκου και της πλημμυρικής αιχμής κατά 22,7% και 24,7% αντίστοιχα.

5. Διαμόρφωση σεναρίου πυρκαγιάς

Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο 1ο Κεφάλαιο γίνεται σαφές ότι τα γεγονότα πυρκαγιάς, ιδίως σε εκτάσεις με υψηλά ποσοστά δασώδους βλάστησης, όπως η περιοχή μελέτης, επιφέρουν μεγάλες διαφοροποιήσεις στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής. Η συγκράτηση από τη βλάστηση είναι πλέον μηδαμινή, ενώ μεταβάλλεται και η ίδια η διηθητικότητα του επιφανειακού εδαφικού στρώματος. Επιπλέον, ο βαθμός στον οποίο μεταβάλλεται το υδρολογικό καθεστώς εξαρτάται και από πολλούς άλλους παράγοντες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, όπως οι προηγούμενες χρήσεις γης, το ποσοστό της καμένης έκτασης, η ένταση, η δριμύτητα και η συχνότητα της φωτιάς, οι ιδιότητες και η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους.

Επόμενο στάδιο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της υδρολογικής απόκρισης της υπό μελέτη λεκάνης με την κατασκευή ενός σεναρίου πυρκαγιάς, ώστε να ελεγχθεί η μεταβολή της απορροής μετά τη φωτιά. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στον ελλαδικό χώρο οι δασικές εκτάσεις είναι αρκετά επιρρεπείς σε πυρκαγιές λόγω των συνθηκών που επικρατούν το καλοκαίρι αλλά και ότι η εξεταζόμενη περιοχή καλύπτεται από μεσογειακό δάσος κωνοφόρων, που είναι από τα πιο εύφλεκτα, θεωρείται ότι η λεκάνη θα καεί ολοσχερώς και επομένως θα έχει ποσοστό κάλυψης μετά την πυρκαγιά 0%. Η ανάλυση της υδρολογικής συμπεριφοράς έγινε στο επαληθευμένο επεισόδιο στις 24/10/2003.

5.1 Καθορισμός υδρολογικών παραμέτρων μετά την πυρκαγιά

Για κάθε υπολεκάνη αφαιρέθηκε η παράμετρος της κομοστέγης (canopy), ενώ οι παράμετροι που μεταβλήθηκαν κατά την προσομοίωση είναι ο αριθμός καμπύλης απορροής (CN), οι αρχικές απώλειες (Ia) και ο χρόνος υστέρησης (t_p), ούτως ώστε να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα η υδρολογική απόκριση της λεκάνης μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς.

5.1.1 Επαναπροσδιορισμός αριθμού καμπύλης CN

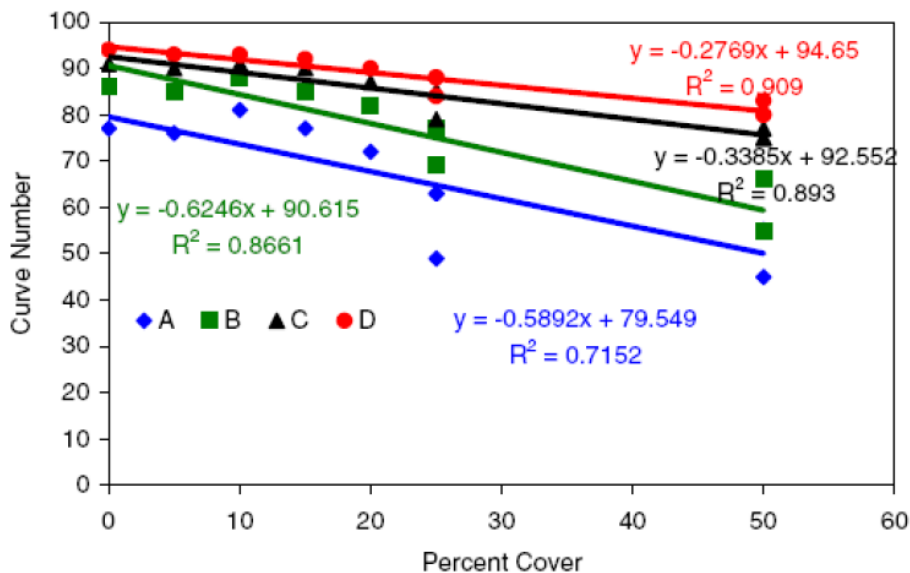
Στη διεθνή βιβλιογραφία γίνεται αναφορά σε δύο τρόπους καθορισμού των τιμών του αριθμού καμπύλης μετά την επίδραση της πυρκαγιάς. Πρώτον, στην επιλογή των τιμών

βασιζόμενοι στην εμπειρία των επιστημόνων, χωρίς την αξιολόγηση δεδομένων που παρατηρούνται μετά από πυρκαγιά και, δεύτερον, στον ακριβή υπολογισμό τους.

Ωστόσο, λίγες είναι οι μελέτες που εκτιμούν την επίδραση της φωτιάς στην υδρολογική απόκριση των λεκανών απορροής, και πιο συγκεκριμένα των μεσογειακών περιοχών. Αυτή η σπανιότητα ποσοτικών υδρολογικών μελετών αντικατοπτρίζει τη δυσκολία απόκτησης αξιόπιστων δεδομένων κατάλληλων για τη σύγκριση των συνθηκών πριν και μετά τη φωτιά.

Αρκετοί ερευνητές έχουν μελετήσει τη μεταβολή του CN μετά από πυρκαγιά συσχετίζοντας την τιμή του CN με την ένταση των πυρκαγιών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός CN άρα και μεγαλύτερες οι πλημμυρικές αιχμές.

Εκτός από τις παραπάνω προσεγγίσεις, έχει αναπτυχθεί και μια άλλη μέθοδος (Goodrich et al., 2005), συνδέοντας τον αριθμό CN με το ποσοστό της χρήσης γης που δεν καίγεται. Συγκεκριμένα, συνδυάστηκαν οι τιμές CN για κάθε ομάδα υδροπερατότητας εδάφους (A, B, C, D) ανάλογα με τις χρήσεις γης, με το ποσοστό κάλυψης μετά τη πυρκαγιά. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η τροποποίηση των τιμών του CN μετά την πυρκαγιά, ανάλογα με το ποσοστό της κάλυψης που καταστράφηκε. Η έρευνα αυτή αναφέρεται σε φυσικές (εξαιρούνται οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις) και αστικές χρήσεις γης.



Διάγραμμα 5.1: Συσχέτιση τιμών CN με ποσοστό κάλυψης για κάθε ομάδα υδροπερατότητας (Πηγή: Goodrich et al., 2005)

Στη μελέτη των McLin et al. (2001), όπου ερευνάται ο κίνδυνος πλημμύρας στην περιοχή Pajarito Plateau στο Μεξικό, μετά την πυρκαγιά Cerro Grande η οποία κατέκαψε 17.352 ha το Μάιο του 2000, υιοθετήθηκαν οι τιμές CN που είχε αποδώσει η ομάδα BAER (Burned Area Emergency Response) της δασικής υπηρεσίας του USDA (United States Department of Agriculture) ανάλογα με την ένταση της πυρκαγιάς στην εκάστοτε περιοχή (BAER, 2000). Για πυρόπληκτες περιοχές από πυρκαγιά υψηλής έντασης (high severity) ορίστηκε η τιμή 90.

Σε μελέτες σαν τη συγκεκριμένη, για πυρόπληκτες δασικές εκτάσεις της Μεσογείου που κάηκαν ολοσχερώς και για ομάδα υδραπερατότητας εδάφους C, οι τιμές που υιοθετούνται για τον αριθμό καμπύλης μετά την πυρκαγιά, λαμβάνοντας υπ' όψιν και τις παραπάνω μεθοδολογίες, είναι 94 (Millington et al., 2009, Symeonakis et al., 2004) και 91 (Αλωνιστιιώτη 2011, Μπατέλης, 2012).

Η τιμή του CN κινείται σε μια κοινή τάξη μεγέθους για όλες τις μελέτες. Τελικά, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των Goodrich et al., διότι θεωρήθηκε πιο λεπτομερής αφού προσδιορίζει τιμές και για τις 4 κατηγορίες υδροπερατότητας εδάφους λαμβάνοντας υπόψη και το ποσοστό κάλυψης μετά την πυρκαγιά. Έτσι, στην παρούσα εργασία, δεδομένου ότι θεωρείται πως το ποσοστό κάλυψης της λεκάνης μετά την πυρκαγιά θα είναι 0%, ο αριθμός καμπύλης CN σύμφωνα με το σχήμα θα λάβει την τιμή 91 για ομάδα υδροπερατότητας εδάφους C.

5.1.2 Επαναπροσδιορισμός αρχικών απωλειών

Από τη βιβλιογραφική έρευνα κατέστη σαφές ότι η τιμή της αρχικής κατακράτησης μετά την πυρκαγιά είναι εξαιρετικά μεταβλητή από περιοχή σε περιοχή λόγω της ισχυρής εξάρτησης από τις συνθήκες που επικρατούν πριν την εκδήλωση της φωτιάς. Εδαφικές ιδιότητες όπως το πορώδες, η κατανομή μεγέθους των πόρων και η υδροπερατότητα, είναι ορισμένοι από τους παράγοντες που επιδρούν καθοριστικά στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης.

Συνεπώς, για τον υπολογισμό των αρχικών απωλειών (Ia) μετά την επίδραση της υπό μελέτη πυρκαγιάς, υπολογίστηκε η νέα τιμή της δυναμικής μέγιστης κατακράτησης (S), από το λόγο Ia/S του ρυθμισμένου μοντέλου, εφαρμόζοντας τον τύπο 3.4 με το νέο αριθμό καμπύλης CN. Η τιμή των αρχικών απωλειών μειώνεται σημαντικά λόγω της αντιστρόφως ανάλογης σχέσης με τον αριθμό καμπύλης.

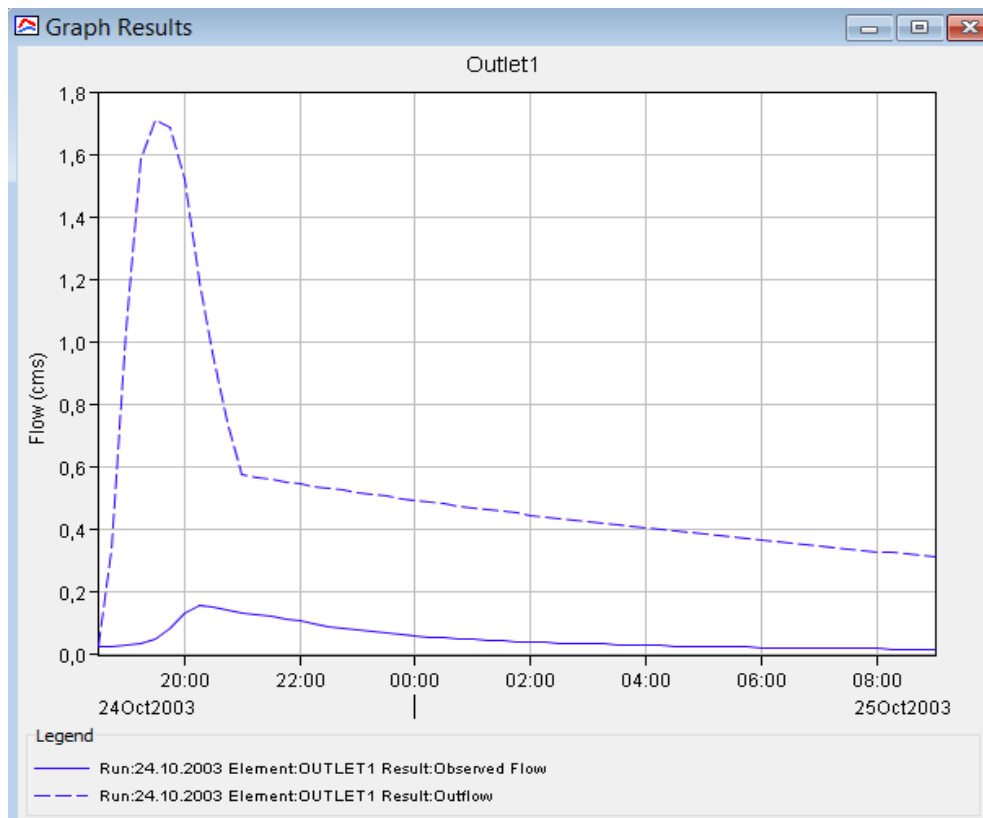
5.1.3 Επαναπροσδιορισμός χρόνου υστέρησης

Ελάχιστες είναι οι υδρολογικές μελέτες που αναφέρονται στον προσδιορισμό του χρόνου υστέρησης μετά από πυρκαγιά. Για το λόγο αυτό έγινε μείωση του κατά 40% με βάση τον μέσο όρο που εξήχθει από τα περιορισμένα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας (Elliot et al., 2004, Candela et al., 2005, Cydzik and Hogue, 2009, Αλωνιστιώτη, 2011).

Πίνακας 5.1: Εκτιμημένες τιμές υδρολογικών παραμέτρων μετά την υπό μελέτη πυρκαγιά

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia (mm)	Lag time (min)
W970	91	1.51	48
W900	91	1.51	6
W1190	91	1.51	21

5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου πυρκαγιάς



Διάγραμμα 5.2: Επεισόδιο 24/10/2003 - Αποτελέσματα προσομοίωσης σεναρίου πυρκαγιάς

Πίνακας 5.2: Σύγκριση πλημμυρικών μεγεθών πριν και μετά την υπό μελέτη πυρκαγιά

	ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 24/10/2003	
	ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ	ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ
ΠΛ.ΑΙΧΜΗ (m³/s)	0.16	1.71
ΩΡΑ ΑΙΧΜΗΣ	24/10/2003, 20:15	24/10/2003, 19:30
ΠΛ. ΟΓΚΟΣ (m³)	2888	28615

Από τα παραγόμενα υδρογραφήματα διαπιστώνεται η οξεία μεταβολή στη συμπεριφορά της λεκάνης μετά την επίδραση της υπό εξέταση πυρκαγιάς. Είναι εμφανής η σημαντική αύξηση όλων των πλημμυρικών μεγεθών· η παροχή αιχμής αλλά και ο πλημμυρικός όγκος δεκαπλασιάζονται (αύξηση κατά 1073% και 991% αντίστοιχα), ενώ ο χρόνος εμφάνισης της πλημμυρικής αιχμής μειώνεται κατά 45 min. Επιπλέον, το υδρογράφημα μετά την πυρκαγιά έχει πιο απότομη κλίση και είναι πιο αιχμηρό συγκριτικά με το παρατηρημένο, λόγω της εμφάνισης απότομης παροχής αιχμής. Τα παραπάνω αποτελέσματα καταδεικνύουν την καθοριστική επίδραση της καμένης έκτασης στις υδρολογικές διαδικασίες, λόγω της απώλειας φυτοκάλυψης και της δημιουργίας αδιαπέρατης επιφάνειας, σε μία πρωτίστως δασική έκταση.

6. Συμπεράσματα

Καίριας σημασίας αποδεικνύεται η συλλογή δεδομένων υδρολογικών παραμέτρων στην περιοχή μελέτης, για την καλύτερη και ασφαλέστερη προσομοίωση του φυσικού συστήματος, μειώνοντας παράλληλα τις αβεβαιότητες που καθορίζουν την υδρολογική συμπεριφορά του. Η συλλογή των κατάλληλων και αξιόπιστων δεδομένων καθώς και η διαρκής επικαιροποίησή τους, δίνουν τη δυνατότητα μιας πιο ολοκληρωμένης εποπτείας και κατανόησης των μηχανισμών γένεσης της απορροής (Μπαριάμης, 2013).

Επίσης, καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχία μιας προσομοίωσης αποτελούν τα πρωτογενή δεδομένα και ο τρόπος διαχείρισής τους. Για το λόγο αυτό καταβλήθηκε μεγάλη προσπάθεια για την επίτευξη όσο το δυνατόν ακριβέστερης ανάλυσης των βροχομετρικών και σταθμηγραφικών δεδομένων από τις μετρητικές ταινίες.

6.1 Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση του μοντέλου έγινε με δύο μεμονωμένα επεισόδια βροχόπτωσης (1/7/2001 και 29/8/2002). Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου διαπιστώθηκε ότι σημαντικό παράγοντα παραμετροποίησης αποτέλεσαν οι αρχικές απώλειες (I_a), οι οποίες είχαν υπερεκτιμηθεί. Με βάση τη μεθοδολογία της SCS οι αρχικές απώλειες υπολογίζονται ως $I_a=0,2S$. Στην παρούσα εργασία, η παραπάνω σύμβαση διαφοροποιήθηκε από τις αρχικές εκτιμήσεις. Ωστόσο είναι συνεπής με τη νεότερη βιβλιογραφία σύμφωνα με την οποία μια τιμή του λόγου I_a/S κοντά στο 0,05 δίνει καλύτερη προσαρμογή και θεωρείται πιο ακριβής (Hawkins et al., 2002). Σχετικά με τις ρυθμισμένες τιμές του χρόνου υστέρησης, όπως αναμενόταν εμφανίζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις από τις αρχικές μικρές τιμές που προέκυψαν από την εμπειρική σχέση της SCS (τύπος 3.7). Οι νέες τιμές προέκυψαν μέσω συγκριτικών εκτιμήσεων των κλίσεων και των διαστάσεων των υπολεκανών. Το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης είναι ικανοποιητικό ως προς τον εντοπισμό των αιχμών και του συνολικού όγκου απορροής, δεδομένων των τιμών του συντελεστή Nash-Sutcliffe και για τα δύο επεισόδια.

6.2 Επαλήθευση

Όσον αφορά τα αποτελέσματα για το επαληθευμένο επεισόδιο στις 24/10/2003, κρίνονται σχετικά ικανοποιητικά με συντελεστή προσδιορισμού $R=0.6$. Είναι εμφανής, ωστόσο, η αξία της συλλογής δεδομένων υδρολογικών και μετεωρολογικών παραμέτρων, για περαιτέρω διερεύνηση του υδρολογικού καθεστώτος στη λεκάνη. Ενώ υπάρχει χρονική ευστοχία στον υπολογισμό της αιχμής, παρατηρείται υπερεκτίμηση του συνολικού όγκου και της παροχής αιχμής της τάξης του 23% και 25% αντίστοιχα.

6.3 Σενάριο πυρκαγιάς

Για την ανάλυση των επιδράσεων της μελετώμενης πυρκαγιάς στην υδρολογική απόκριση της λεκάνης, θεωρήθηκε αναγκαίος ο επαναπροσδιορισμός των παραμέτρων του μοντέλου, με βάση αντίστοιχα αποτελέσματα μελετών της διεθνούς βιβλιογραφίας, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν στη συγκεκριμένη περιοχή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αντανακλούν την καταλυτική επίδραση της καμένης έκτασης στην υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής, ιδίως στις μεσογειακές περιοχές που είναι επιρρεπείς σε τέτοιους κινδύνους.

Η φωτιά καταστρέφει τη βλάστηση του εδάφους και συμβάλλει στη διάβρωση και στην αύξηση της υδροφοβικότητάς του, με αποτέλεσμα την αύξηση των πλημμυρικών μεγεθών και την εμφάνιση οξύτερων πλημμυρικών φαινομένων. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί ξανά ότι έχει αποδειχθεί από αρκετές μελέτες σε λεκάνες που έχουν καεί, ότι οι αλλαγές στην υδρολογία της περιοχής και η αύξηση των πλημμυρικών φαινομένων είναι εντονότερες τον πρώτο χρόνο μετά τη φωτιά και μειώνονται από το δεύτερο χρόνο. Αυτό το συμπέρασμα οδηγεί στη θεώρηση ότι το παραγόμενο υδρογράφημα είναι χρονικά εξαρτημένο.

6.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία η επιλογή των προτύπων για την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης έγινε βάσει των διαθέσιμων δεδομένων για την περιοχή μελέτης. Προτείνεται, λοιπόν, η διερεύνηση και εναλλακτικών μεθόδων από ένα σύνολο επιλογών που

διαθέτει το πρόγραμμα HEC-HMS, τόσο σε επίπεδο μεμονωμένου επεισοδίου βροχής όσο και σε συνεχή προσομοίωση ενός υδρολογικού έτους.

Επιπροσθέτως, θα μπορούσαν να επεκταθούν οι διαδικασίες της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης του μοντέλου με μελέτη περισσότερων γεγονότων βροχόπτωσης, ώστε να αποκτηθεί εμπειρία, όσον αφορά τις υδρολογικές συνιστώσες, που θα οδηγήσει στη βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου και στη μείωση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων του. Για μια πιο ολοκληρωμένη μελέτη του υδρολογικού καθεστώτος στην περιοχή, θα πρέπει να πραγματοποιηθεί και μελέτη του μηχανισμού της υπόγειας ροής.

Όσον αφορά τη διαμόρφωση του σεναρίου πυρκαγιάς, η προτεινόμενη μεθοδολογία θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε παρόμοιες λεκάνες απορροής, με μεγαλύτερο εύρος δεδομένων, επιβεβαιώνοντας με αυτό τον τρόπο την ισχύ της και αυξάνοντας την ακρίβεια και τη γενικότητά της.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ελληνική βιβλιογραφία

Αθανασιάδης, Ν., 1986. *Δασική Βοτανική Μέρος II: Δένδρα και θάμνοι των Δασών της Ελλάδος*, Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.

Αλωνιστιώτη, Δ., 2011. *Διερεύνηση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση λεκανών απορροής της ανατολικής Αττικής*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Γκικόκας, Α., 2009. *Κατάρτιση μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας, Εφαρμογή στο Νομό Αρκαδίας*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Δασαρχείο Καρπενησίου Ν. Ευρυτανίας, 2008. *Διαχειριστική μελέτη του δημοσίου δάσους Αγίου Νικολάου Νομού Ευρυτανίας (2008-2017)*.

Ευστρατιάδης, Α., 2008. *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*, Διδακτορική διατριβή, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ευστρατιάδης, Α., Κουτσογιάννης, Δ., Μαμάσης, Ν., Δημητριάδης, Π., Μαχαίρας, Π., 2012. *Βιβλιογραφική επισκόπηση υδρολογίας πλημμυρών και συναφών εργαλείων*, ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Καραμήτρος, Ε., 1974. *Αι εν Ελλάδι έρευναι επί πειραματικών λεκανών απορροής*, Ελληνική Γεωλογική Εταιρεία, Τόμος XI, Τεύχος 1:155-173.

Καψάλης, Π.Κ., 2009. *Προσομοίωση της ανάντη λεκάνης του ποταμού Πηνειού και ανάλυση εναισθησίας με χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

- Κουτσογιάννης, Δ., Ξανθόπουλος, Θ., 1999. *Τεχνική Υδρολογία*, 3η Έκδοση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Κωτούλας, Δ., 2001. *Ορεινή Υδρονομική Τόμος I: Τα Ρέοντα Ύδατα*, Τμήμα Εκδόσεων Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- Μαμάσης, Ν., 2012. Σημειώσεις μαθήματος *Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά έργα*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μάρης, Φ.Π., 2013. Σημειώσεις μαθήματος *Φυτοτεχνικές Διευθετήσεις*, Τμήμα Δασολογίας και Διαχείρισης Περιβάλλοντος και Φυσικών Πόρων, Εργαστήριο Διευθέτησης Ορεινών Υδάτων και Διαχείρισης Κινδύνου, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ορεστιάδα.
- Μιμίκου, Μ.Α., 2013. Σημειώσεις μαθήματος *Πλημμύρες και Αντιπλημμυρικά έργα*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μιμίκου, Μ.Α., 2006. *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*, 3η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Μιμίκου, Μ.Α., Μπαλτάς, Ε.Α., 2006. *Τεχνική Υδρολογία*, 4η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
- Μίσθου Μ.Λ., 2006. *Ανάλυση Μορφομετρικών Παραμέτρων Υδρολογικής Λεκάνης με χρήση GIS*, Πτυχιακή Εργασία, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Γεωγραφίας, Αθήνα.
- Μπαλούτσος, Γ., Μπουρλέτσικας Α., Καούκης, Κ., (2005): Μελέτη και διερεύνηση χαρακτηριστικών ομιχλοβροχής στο ελατοδάσος Αγίου Νικολάου Ευρυτανίας. "Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα", Τόμος 16, Σειρά II, Τεύχος 1: 34-45.
- Μπαλούτσος, Γ., Οικονόμου, Α., Καούκης, Κ., 2001. Ο κίνδυνος πλημμύρας σε λεκάνες απορροής μετά από πυρκαγιά: Ανάλυση του προβλήματος και άμεσα μέτρα μείωσης των επιπτώσεων, *Πρακτικά της διημερίδας του Υπουργείου Εσωτερικών με θέμα: Αποκατάσταση καμένων εκτάσεων*, σελ. 79-104, ΕΘΙΑΓΕ, Αθήνα.

- Μπαλάς Ε.Α., 2013. Σημειώσεις μαθήματος *Προχωρημένη Υδρολογία*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μπαριάμης, Γ., 2013. *Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS και εφαρμογή στη λεκάνη του ρέματος Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μπατέλης Σ., 2012. *Επίδραση των πυρκαγιών στο υδατικό δυναμικό λεκανών απορροής: Η περίπτωση του ποταμού Ενιπέα Θεσσαλίας*, Διπλωματική εργασία, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Νικολαΐδης, Μ., 1980. *Διακράτηση κομοστέγης δάσους, Υδατοκατανάλωση δασοσυστάδων και ποώδους βλάστησης στον ελληνικό χώρο*, Υπουργείο Συντονισμού.
- Ντάφης, Α.Σ., 1986. *Δασική Οικολογία*, Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.
- Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την Αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, *Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης* L 288/27, 6 Νοεμβρίου 2007.
- Παγάνα, Β.Ε., 2012. *Κατάρτιση χαρτών πλημμύρας στην περιοχή της Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Παπούλιας, Ι., 1975. *Η υδατοσυγκράτησις δάσους τραχείας πέυκης και η υδρολογική σημασία αυτής*, Υπουργείο Γεωργίας, Γενική Διεύθυνση Δασών, Θεσσαλονίκη.
- Στάμου, Λ., Σκοπελίτη, Α., 2013. *Παρουσίαση στο μάθημα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στους Υδατικούς Πόρους*, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Anderson, H.W., Marvin, D.H., Kenneth, G.R., 1976. *Forest and water: effects of forest management on floods, sedimentation, and water supply*, General Technical Report PSW-18, USDA (Forest Service), Berkeley, California.
- Aussenac., G., 1968. Interception des précipitations par le couvert forestier, *Ann. Sci. forest*, 25 (3): 135-156.
- BAER, 2000. *Cerro Grande Fire Burned Area Emergency Rehabilitation Plan*, Interagency BAER Team, Los Alamos, New Mexico.
- Brown, J.A.H., 1972. Hydrologic effects of a bushfire in a catchment in south-eastern new South Wales, *Journal of Hydrology*, 15: 77-96.
- Campbell, R.E., Baker Jr. M.B., Folliott, P.F., Larson, F.R., Avery, C.C., 1977. Wildfire effects on a Ponderosa Pine ecosystem: An Arizona case study. *USDA Forest Service Papers*, RM-191, Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station, Fort Collins, Colorado.
- Candela, A., Aronica, G., Santoro, M., 2005. Effects of forest fires on flood frequency curves in a Mediterranean catchment, *Hydrological Science Journal*, 50 (2): 193–206.
- Chang, K., 2003. *Introduction to Geographic Information Systems*, 2nd Ed, McGraw-Hill, New York.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1988. *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- Cydzik, K., Hogue, T.S, 2009. Modeling Postfire Response and Recovery using the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 45 (3): 702-714.
- De Bano, L.F., 2000. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review, *Journal of Hydrology*, 231-232: 195-206.

- De Bano, L.F., Neary, D.G., Folliot, P.F., 1998. *Fire's Effect on Ecosystems*, John Willey and Sons, New York.
- Elliott, J.G., Smith, M.E., Friedel, M.J., Stevens, M.R., Bossong, C.R., Litke, D.W., Parker, R.S., Costello, C., Wagner, J., Char, S.J., Bauer, M.A., Wilds, S.R., 2004. Analysis and Mapping of Post-Fire Hydrologic Hazards for the 2002 Hayman, Coal Seam, and Missionary Ridge Wildfires, Colorado, *Scientific Investigations Report 2004-5300*, U.S. Geological Survey.
- European Commission, 2014. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2013, *JRC Technical Reports*, EUR 26791, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- FAO - Unesco, 1988. *Soil map of the World*, FAO - Unesco, Rome, Italy.
- Feldman, A., 2000. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Fleming, M.J., Doan, J.H., 2010. *HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, User's Manual*, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, version 5.0.
- Goodrich, D.C., Canfield, H.E., Burns, I.S., Semmens, D.J., Miller, S.N., Hernandez, M., Levick, L.R., Guertin, D.P., Kepner, W.G., 2005. Rapid Post-Fire Hydrologic Watershed Assessment using the AGWA GIS-based Hydrologic Modeling Tool, *Proceedings of the ASCE Watershed Management Conference*, Williamsburg, VA.
- Hawkins R.H., Jiang R., Woodward D.E., Hjelmfelt A.T., Van Mullem J.A., 2002. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio, *Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, Nevada.
- Hudson, J., Kellman, M., Sanmugadas, K., Alvarado, C., 1983. Prescribed burning *Pinus occarpa* in Honduras, *Forest Ecology and Management*, 5: 269-281.
- Inbar, M., Tamir, M., Wittenberg, L., 1998. Runoff and erosion processes after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area, *Geomorphology*, 24: 17-33.

- Jenson, S.K., Domingue, J.O., 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1593-1600.
- Lavabre, J., Torres, D.S., Cernesson, F., 1993. Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire, *Journal of Hydrology*, 142: 273-299.
- Letey, J., 2001. Causes and consequences of fire-induced soil water repellency, *Hydrological Processes*, 15: 2867–2875.
- López, R., Batalla, R.J., 2001. Análisis del comportamiento hidrológico de la cuenca mediterránea de Arbúcies antes y después de un incendio forestal, *III Congreso Forestal Español*, Granada.
- McLin, S.G., Springer, E.P., Lane, L.J., 2001. Predicting Floodplain Boundary Changes Following the Cerro Grande Wildfire, *Hydrological Processes*, 15: 2967-2980.
- Millington, J.D.A., Wainwright, J., Perry, G.L.W., Romero-Calcerrada, R., Malamud, B.D., 2009. Modelling Mediterranean landscape succession-disturbance dynamics: A landscape fire-succession model, *Environmental Modelling and Software*, 24: 1196-1208.
- Nash, J. E , Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models Part I -a discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10 (3): 282-290.
- Nasser, I., 1988. Frequency of floods from a burned chaparral watershed, *Proceeding of the symposium on fire and watershed management*, General Technical Report PSW-109, USDA (Forest Service), Berkeley, California.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS), 1986. *Urban hydrology for small watersheds*, Technical Release 55 (TR-55), U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2004. *National Engineering Handbook*, Part 630 Hydrology, Chapters 9 and 10, U.S. Department of Agriculture.

- Pilgrim, D. H., Cordery, I., 1992. Flood runoff, *Handbook of Hydrology* (D.R. Maidment ed.), McGraw-Hill, New York.
- Scharffenberg, W.A., Fleming, M.J., 2010. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, User's Manual*, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, version 3.5.
- Scott, D.F., 1993. The hydrological effects of fire in South African mountain catchments, *Journal of Hydrology*, 150: 409-432.
- Scott, D.F., Van Wyk, D.B., 1990. The effects of wildfire on soil wettability and hydrological behaviour of an afforested catchment, *Journal of Hydrology*, 121: 239-256.
- Soil Conservation Service, 1972. *National Engineering Handbook*, Section 4, Hydrology, Chapter 19, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Symeonakis, E., Koukoulas, S., Calvo-Cases, A., Arnau-Rosalen, E., Makris, I., 2004. A landuse change and land degradation study in Spain and Greece using remote sensing and GIS, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXth ISPRS Congress.
- Wanielista, M., Kersten, R., Eaglin, R., (1997). *Hydrology: Water quantity and quality control*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.
- Wilson, E.M., 1990. *Engineering Hydrology*, 4th Ed., MacMillan.

Διαδικτυακοί Ιστότοποι

<http://www.ypeka.gr>

<http://www.fria.gr>

<http://edu.chi.civil.ntua.gr>

<http://insma.udg.es/isse2001/papers/Batalla.html>

<http://forest.moscowfsl.wsu.edu/BAERTOOLS/ROADTRT/Peakflow/CN/>