



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
(Δ.Π.Μ.Σ) «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»**

**2<sup>η</sup> ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ  
ΟΡΕΙΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ»**

**«Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου  
HEC-HMS στην ορεινή πειραματική  
λεκάνη Βαρετάδας Αμφιλοχίας.»**

**Περιβάλλον  
και  
Ανάπτυξη**

**Πολυξένη Μπενέκου**

**Επιβλέπων: Μπαλτάς Ευάγγελος  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Ε.Μ.Π**

**Αθήνα, Ιούνιος 2014**

# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
(Δ.Π.Μ.Σ) «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»**

**2<sup>η</sup> ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ  
ΟΡΕΙΝΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ»**

**«Εφαρμογή του υδρολογικού μοντέλου HEC-HMS στην ορεινή  
πειραματική λεκάνη Βαρετάδας Αμφιλοχίας.»**

Μεταπτυχιακή εργασία:  
Πολυξένη Κ. Μπενέκου

Επιβλέπων: Μπαλτάς Ευάγγελος  
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ιουνίου 2014.

.....  
Μπαλτάς Ευάγγελος  
Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Μαμάσης Νικόλαος  
Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Μάρης Φώτιος  
Επικουρος Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Αθήνα, Ιούνιος 2014.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Τελειώνοντας τη μεταπτυχιακή μου εργασία, οφείλω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν για την εκπόνηση της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή κ. Μπαλτά Ευάγγελο Αναπληρωτή Καθηγητή του ΕΜΠ που μου εμπιστεύθηκε την ανάληψη της παρούσας εργασίας. Η καθοδήγηση, η πρόθυμη συνεργασία και η υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια διεκπεραίωσης της μεταπτυχιακής εργασίας ήταν σημαντική.

Ακόμη θέλω να ευχαριστήσω τους κ. Μαμάση Νικόλαο Επίκουρο Καθηγητή του ΕΜΠ καθώς και Μάρη Φώτιο Επίκουρο Καθηγητή του Δ.Π.Θ. που δέχτηκαν να αποτελέσουν μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής. Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον κ. Μπουρλέτσικα Αθάνασιο, Δασολόγο-Υδρολόγο, Επιστημονικό Συνεργάτη στο Ινστιτούτο Δασικών Μεσογειακών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ&ΤΔΠ), για την παροχή των υδρολογικών στοιχείων καθώς και οποιασδήποτε πληροφορίας αφορά την περιοχή μελέτης. Πολύτιμη υπήρξε η βοήθεια και η καθοδήγηση από τον Υποψήφιο Διδάκτορα Μπαριάμη Γεώργιο σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Θέλω να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, για τη διαρκή ηθική και οικονομική υποστήριξη, τη συμπαράσταση, την αγάπη και την κατανόηση όλα αυτά τα χρόνια, που μου επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου.

Τέλος να ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου για τη βοήθεια και τη συμπαράσταση τους σε κάθε μου βήμα.

Πολυξένη Κ. Μπενέκου

## Περίληψη

Οι ορεινές περιοχές αποτελούν θύλακες βιοποικιλότητας που απειλούνται πλέον από σοβαρότατους κινδύνους από φυσικές καταστροφές, όπως δασικές πυρκαγιές, πλημμύρες και κατολισθήσεις. Τα ορεινά δασικά οικοσυστήματα έχουν σημαντική οικολογική αξία και ιδιαίτερη και πολύπλευρη σημασία για την επιβίωση του ανθρώπου, καθώς είναι ένας ανανεώσιμος φυσικός πόρος που συμβάλει στην καλύτερη ποιότητα ζωής. Παρ' όλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι τα ορεινά δάση δεν είναι, πλέον, άτρωτα και υφίστανται σε μεγάλο βαθμό υποβάθμιση. Στην Ελλάδα τις τελευταίες δεκαετίες, οι δασικές πυρκαγιές και οι πλημμύρες παρουσιάζουν ιδιαίτερη ένταση. Μελλοντικά αναμένεται αύξηση της έντασης και της συχνότητας τους.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εφαρμόζεται το υδρολογικό μοντέλο, το HEC-HMS, για την εκτίμηση της υδρολογικής απόκρισης μιας μικρής ορεινής δασικής λεκάνης απορροής πριν και μετά από μια ενδεχόμενη πυρκαγιά. Προσομοιώθηκαν μεμονωμένα γεγονότα βροχής με δύο διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού της άμεσης απορροής, του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος της Soil Conservation Service (SCS) και του Συνθετικού Μοναδιαίου Υδρογραφήματος Snyder.

Η περιοχή που μελετήθηκε είναι μια από τις τρεις πειραματικές λεκάνες απορροής του Ινστιτούτου Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ&ΤΔΠ). Η λεκάνη απορροής του ρέματος Πουρνόσκαλα βρίσκεται στην περιοχή Βαρετάδα του Νομού Αιτωλοακαρνανίας και έχει έκταση 1,235 km<sup>2</sup>. Η συγκεκριμένη λεκάνη επιλέχθηκε λόγω του ορεινού της χαρακτήρα και λόγω του ότι παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον για πλημμυρική διερεύνηση. Το ΙΜΔΟ&ΤΔΠ μας παρείχε όλα τα απαραίτητα βροχομετρικά και σταθμημετρικά δεδομένα, σε βήμα 15 min, τα οποία αποτέλεσαν δεδομένα εισόδου στην προσομοίωση και επέτρεψαν στη βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου. Στην εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το οποίο επεξεργάστηκε από το πρόγραμμα ArcGIS 9.3, και εξήγαγε τις απαραίτητες γεωμορφολογικές παραμέτρους για τη διαδικασία της προσομοίωσης. Με δεδομένα όλα τα παραπάνω πραγματοποιήθηκε υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης για τέσσερα ξεχωριστά γεγονότα βροχής, όπου εφαρμόζοντας τις δύο μεθόδους υπολογισμού άμεσης απορροής SCS και Snyder, υπολογίστηκαν τα υδρογραφήματα εξόδου. Ακολούθησε βαθμονόμηση και επαλήθευση του υδρολογικού μοντέλου, σε ένα επεισόδιο βροχής.

Τέλος, στο πλαίσιο της εργασίας επαναπροσδιορίστηκαν οι παράμετροι του υδρολογικού μοντέλου (κατακράτηση από τη φυτοκόμη, αριθμός καμπύλης CN, αρχικές απώλειες Ia) μετά την επίδραση μιας ενδεχόμενης πυρκαγιάς μέτριας έντασης, σύμφωνα με τιμές που πάρθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία.

## **Abstract**

Mountainous areas biodiversity is rich and threatened by most serious risks from natural disasters such as forest fires, floods and landslides.

Mountain forests are particularly important ecosystems and useful for the society as it is a renewable natural resource that contributes to better quality of life. Nevertheless, it is worth noting that the mountain forests are no longer invulnerable since there greatly degraded.

During the last decades, in Greece, they have become particularly intense. In the future, an increase in the frequency and intensity of forest fires and floods is expected.

In the present Master thesis, we applied the hydrological model, HEC-HMS, for the assessment of the hydrological response of a small mountainous forest watershed before and after a possible fire. Individual rainfall events were simulated with two different methods of calculation of direct runoff, the unit hydrograph of the Soil Conservation Service (SCS) and the Synthetic unit hydrograph Snyder.

The studied area is one of the three experimental watersheds of the Institute of Mediterranean Forest Ecosystems and Forest Products Technology (FRIA). The watershed of the stream Pournoskala is located in Varetada in the region of Aitolokarnania and covers an area of 1,235 km<sup>2</sup>. This watershed was chosen because of its mountainous nature and its great interest to investigate flood. All the necessary Meteorologic and observed flow data were provided by the FRIA, in 15 min step, which were used as the input to the simulation and allowed the calibration of the hydrological model. The digital terrain model was also used in the application, which was processed by the program ArcGIS 9.3, and the necessary geomorphological parameters for process simulation were extracted. Given all the above, hydrological watershed simulation was held for four separate rain events, where the hydrographs output were calculated by applying the two methods of calculating the direct runoff SCS and Snyder. The calibration and verification of the hydrological model in an episode of rain was followed. Last but not least, in the context of work the parameters of the hydrological model (interception, curve number CN, initial losses Ia) were redefined after the effect of a possible fire of moderate intensity, in accordance with values taken from the literature.



## Περιεχόμενα

<b>1. Εισαγωγή</b> .....	<b>13</b>
1.1 Αντικείμενο της εργασίας .....	13
1.2 Σκοπός της εργασίας.....	13
1.3 Δομή της εργασίας .....	14
1.4 Βασικές έννοιες.....	14
1.4.1 Γενικά .....	14
1.4.2 Ο Υδρολογικός κύκλος .....	15
1.4.3 Το Υδρολογικό ισοζύγιο .....	17
1.5 Το ζήτημα των πλημμυρών .....	18
1.5.1. Γενικά.....	18
1.5.2. Αίτια των πλημμυρών .....	20
1.5.3. Αντιμετώπιση των πλημμυρών .....	21
1.5.4. Ορεινά Υδρονομικά Έργα .....	22
1.6 Θεσμικό πλαίσιο για τα νερά .....	24
1.7 Δασικές πυρκαγιές .....	29
1.7.1. Άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών.....	30
1.7.2. Επίδραση δασικών πυρκαγιών στην υδρολογία.....	33
<b>2. Περιοχή μελέτης-Ανάλυση δεδομένων</b> .....	<b>38</b>
2.1 Περιγραφή λεκάνης απορροής Βαρετάδας.....	39
2.1.1. Γεωλογικά χαρακτηριστικά.....	41
2.1.2. Κάλυψη και χρήσεις γης.....	42
2.1.3. Κλίμα.....	43
2.1.4. Εξοπλισμός των μετρήσεων της περιοχής μελέτης .....	46
2.2 Γεωμορφολογική προσομοίωση.....	49
2.2.1. Εισαγωγή και επεξεργασία αρχικών γεωχωρικών δεδομένων .....	49
2.2.2. Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους .....	51
2.2.3. Επεξήγηση εντολών .....	52
2.2.4. Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου HEC– HMS.....	58
2.2.5. Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.....	60

2.2.6. Τελικό στάδιο επεξεργασίας και προετοιμασία για εξαγωγή δεδομένων εισόδου για το HEC – HMS .....	61
<b>3. Το λογισμικό HEC-HMS - Γενικά .....</b>	<b>63</b>
3.1. Το Μοντέλο HEC-HMS.....	64
3.1.1. Μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model) .....	65
3.1.2. Μετεωρολογικό Μοντέλο .....	65
3.2. Χρονικός έλεγχος υδρολογικής προσομοίωσης .....	68
3.2.2. Εισαγωγή δεδομένων των παρατηρημένων παροχών .....	68
3.3. Υπολογισμός απωλειών.....	69
3.3.1. Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης. ....	69
3.3.2. Εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων με τη μέθοδο της SCS.....	70
3.3.3. Υπολογισμός αρχικών απωλειών Ia.....	73
3.4. Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής. ....	74
3.4.1. Το μοναδιαίο υδρογράφημα.....	74
3.4.2. Συνθετικό αδιάστατο υδρογράφημα της SCS .....	75
3.4.3. Χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης .....	76
3.4.4. Εισαγωγή δεδομένων υπολογισμού άμεσης απορροής κατά SCS στο HEC – HMS 77	
3.4.5. Συνθετικό Μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder .....	77
3.4.6. Εισαγωγή δεδομένων υπολογισμού άμεσης απορροής κατά Snyder στο HEC - HMS .....	79
3.5. Πρότυπο υπολογισμού διόδευσης.....	80
3.6. Πρότυπο βασικής απορροής.....	81
<b>4. Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου HEC-HMS. ....</b>	<b>84</b>
4.1. Προσομοίωση με βάση τη μέθοδο μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS..	84
4.1.1 Επεισόδιο #2 – 01/12/1998 .....	85
4.1.2 Επεισόδιο #3 – 21/12/1998 .....	86
4.1.3. Επεισόδιο #4 – 09/01/2001.....	87
4.1.4 Επεισόδιο #5 – 05/09/2001 .....	88
4.1.5 Παρατηρήσεις επί των αρχικών αποτελεσμάτων.....	89



4.2. Προσομοίωση με βάση τη μέθοδο μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SNYDER .....	90
4.2.1. Επεισόδιο #2 – 01/12/1998.....	90
4.2.2. Επεισόδιο #3 – 21/12/1998.....	90
4.2.3. Επεισόδιο #4 – 09/01/2001.....	91
4.2.4. Επεισόδιο #5 – 05/09/2001 .....	91
4.2.5. Παρατηρήσεις επί των αρχικών αποτελεσμάτων .....	91
4.3 Βαθμονόμηση .....	92
4.3.1 Πορεία βαθμονόμησης .....	94
4.4 Αποτελέσματα βαθμονόμησης .....	95
4.4.1 Μέθοδος υπολογισμού μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SNYDER .....	95
4.4.2 Επεισόδιο #2 – 01/12/1998 .....	95
4.4.3 Επεισόδιο #3 – 21/12/1998.....	96
4.4.4 Επεισόδιο #4 – 09/01/2001 .....	97
4.4.5 Επεισόδιο #5 – 05/09/2001 .....	98
4.4.6 Μέθοδος υπολογισμού μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS .....	99
4.4.7 Επεισόδιο #2 – 01/12/1998 .....	99
4.4.8 Επεισόδιο #3 – 21/12/1998 .....	100
4.4.9 Επεισόδιο #4 – 09/01/2001 .....	101
4.4.10 Επεισόδιο #5 – 05/09/2001 .....	102
4.5 Επαλήθευση μοντέλου .....	102
4.5.1 Αποτελέσματα επαλήθευσης επεισοδίου #1 – 01/02/1998 .....	104
<b>5. Σενάριο πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης. ....</b>	<b>106</b>
5.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά από πυρκαγιά για τη μέθοδο SCS. ....	107
5.1.1 Επεισόδιο #1-04/02/1998 μετά από πυρκαγιά. ....	107
5.1.2 Επεισόδιο #2-01/12/1998 μετά από πυρκαγιά. ....	107
5.1.3 Επεισόδιο #3-21/12/1998 μετά από πυρκαγιά. ....	108
5.1.4 Επεισόδιο #4-09/01/2001 μετά από πυρκαγιά. ....	108
5.1.5 Επεισόδιο #5-05/09/2001 μετά από πυρκαγιά. ....	109

5.1.6 Παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων μετά από πυρκαγιά με τη μέθοδο SCS.	109
5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά από πυρκαγιά για τη μέθοδο SNYDER.	110
5.2.1 Επεισόδιο #1-04/02/1998 μετά από πυρκαγιά.....	110
5.2.2 Επεισόδιο #2-01/12/1998 μετά από πυρκαγιά.....	111
5.2.3 Επεισόδιο #3-21/12/1998 μετά από πυρκαγιά.....	111
5.2.4 Επεισόδιο #4-09/01/2001 μετά από πυρκαγιά.....	112
5.2.5 Επεισόδιο #5-05/09/2001 μετά από πυρκαγιά.....	112
5.2.6 Παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων μετά από πυρκαγιά με τη μέθοδο SNYDER.....	113
<b>6. Συμπεράσματα .....</b>	<b>115</b>
6.1. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	116
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>117</b>



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

---

### 1. Εισαγωγή

- 1.1 Αντικείμενο της εργασίας
- 1.2 Σκοπός της εργασίας
- 1.3 Δομή της εργασίας
- 1.4 Βασικές έννοιες
- 1.5 Το ζήτημα των πλημμυρών
- 1.6 Θεσμικό πλαίσιο για τα νερά
- 1.7 Δασικές πυρκαγιές

## **1. Εισαγωγή**

### **1.1 Αντικείμενο της εργασίας**

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο την εφαρμογή ενός ημικατανεμημένου υδρολογικού μοντέλου, σε μια μικρή ορεινή δασική λεκάνη απορροής της δυτικής Στερεάς Ελλάδας. Γίνεται, έτσι, μια προσπάθεια εκτίμησης των πλημμυρικών μεγεθών της εν λόγω δασικής υδρολογικής λεκάνης, η οποία έγκειται στην εφαρμογή μεμονωμένων επεισοδίων βροχής. Ως απώτερος στόχος, είναι η διερεύνηση της πλημμυρικής συμπεριφοράς της λεκάνης τόσο πριν όσο και μετά από μια πιθανή πυρκαγιά.

Η περιοχή που επιλέχθηκε στην εν λόγω εργασία, για να εφαρμοστεί το μοντέλο προσομοίωσης είναι μια μικρή, ορεινή, πειραματική, δασική υδρολογική λεκάνη απορροής του Ινστιτούτου Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ&ΤΔΠ) του πρώην Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ). Βρίσκεται στη Βαρετάδα Αμφιλοχίας του Νομού Αιτωλοακαρνανίας, έχει έκταση 1,235 km<sup>2</sup>, μέσο υψόμετρο 529,6 m, μέση κλίση 13,5%. Παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον, όσον αφορά τον προσδιορισμό των υδρολογικών παραμέτρων, λόγω και της θέσης της αλλά και λόγω της χωρικής κατανομής των βροχοπτώσεων στην Ελλάδα.

Για την υλοποίηση αυτής της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ψηφιακό μοντέλο εδάφους που παραχωρήθηκε από την ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ Α.Ε., καθώς και βροχομετρικά και σταθμημετρικά δεδομένα πέντε (5) επεισοδίων με χρονικό βήμα 15min, παρατηρήσεις που επιλέχθηκαν από τον βροχομετρικό και υδρομετρικό σταθμό αντίστοιχα.

### **1.2 Σκοπός της εργασίας**

Κύριος σκοπός αυτής της εργασίας, είναι η υδρολογική προσομοίωση πέντε (5) μεμονωμένων επεισοδίων βροχής (04/02/1998, 01/12/1998, 21/12/1998, 09/01/2001 και 05/09/2001), με δύο μεθόδους υπολογισμού άμεσης απορροής ( ΜΥΓ κατά SCS και Συνθετικό ΜΥΓ κατά Snyder ) για τον προσδιορισμό των υδρολογικών παραμέτρων της λεκάνης. Έπειτα, ακολούθησε βαθμονόμηση του μοντέλου και επαλήθευση των αποτελεσμάτων, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν προσδιορίστηκαν ορθά οι υδρολογικοί παράμετροι που εισήχθησαν στο μοντέλο και επιτεύχθηκε αντιπροσωπευτική εκτίμηση των πλημμυρικών μεγεθών. Τέλος,

δημιουργήθηκε/θεωρήθηκε ένα υποθετικό σενάριο πυρκαγιάς, μέτριας έντασης, με στόχο να εξεταστεί (διερευνηθεί) η, πλημμυρική συμπεριφορά της δασοκαλυμμένης λεκάνης μετά από πυρκαγιά.

### **1.3 Δομή της εργασίας**

Συνοπτικά, η διάρθρωση των κεφαλαίων που αναπτύσσονται στην εν λόγω εργασία είναι η ακόλουθη:

- Θεωρητικό υπόβαθρο βασικών υδρολογικών εννοιών.
- Το ζήτημα των πλημμύρων: Αίτια και αντιμετώπιση σε ορεινές περιοχές.
- Θεσμικό Πλαίσιο Ελλάδας - Ε.Ε. για τα νερά.
- Περιγραφή της περιοχής μελέτης.
- Παρουσίαση μετεωρολογικού και υδρομετρικού εξοπλισμού
- Επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM) της περιοχής και εξαγωγή υδρολογικών παραμέτρων μέσω της εργαλειοθήκης HEC – GeoHMS του ArcGIS.
- Μοντέλα υδρολογικής προσομοίωσης και υπολογισμός υδρογραφημάτων μέσω του HEC – HMS.
- Παρουσίαση αποτελεσμάτων προσομοίωσης
- Βαθμονόμηση Υδρολογικών Μοντέλων SCS/Snyder
- Επαλήθευση Υδρολογικών Μοντέλων Snyder
- Σενάριο υποθετικής πυρκαγιάς και υπολογισμός υδρολογικών παραμέτρων
- Σύγκριση αποτελεσμάτων
- Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα.

### **1.4 Βασικές έννοιες**

#### **1.4.1 Γενικά**

Ως Υδρολογία ορίζεται η επιστήμη η οποία περιγράφει την εμφάνιση, την κυκλοφορία και τη διανομή του νερού της γης, καθώς και την αλληλεπίδραση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων με το περιβάλλον (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006).

Αντικείμενο της Υδρολογίας αποτελεί η από επιστημονικής άποψης εξέταση διάφορων φάσεων του νερού, ιδιαίτερος δε η χωρική και χρονική μεταβολή της

έντασης που λαμβάνουν χώρα αυτές (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006). Ο κλάδος της Υδρολογίας, ο οποίος ασχολείται με τη μελέτη της κινήσεως του νερού και ότι αυτό συνεπάγεται από τη στιγμή που η βροχή πέφτει στο έδαφος μέχρις ότου καταλήξει στους τελικούς αποδέκτες (θάλασσα, λίμνες) είναι γνωστός ως Τεχνική Υδρολογία.

Ωστόσο η Υδρολογία συνδέεται στενά και με τη δασική επιστήμη, ως φυσικό επακόλουθο της σχέσης του νερού με το δέντρο, την ατμόσφαιρα και το έδαφος. Ο τομέας της Δασικής Υδρολογίας ασχολείται με την κίνηση του νερού εντός των δασικών οικοσυστημάτων, μελετάει τις επιδράσεις και τη σημασία του δάσους και της δασικής βλάστησης στα επιμέρους συστατικά του υδρολογικού ισοζυγίου τους, στην ποιότητα του νερού και στη διάβρωση του εδάφους. Αναμφίβολα λοιπόν, ο ρόλος των δασών στην Υδρολογία είναι πρωταρχικής σημασίας.

#### **1.4.2 Ο Υδρολογικός κύκλος**

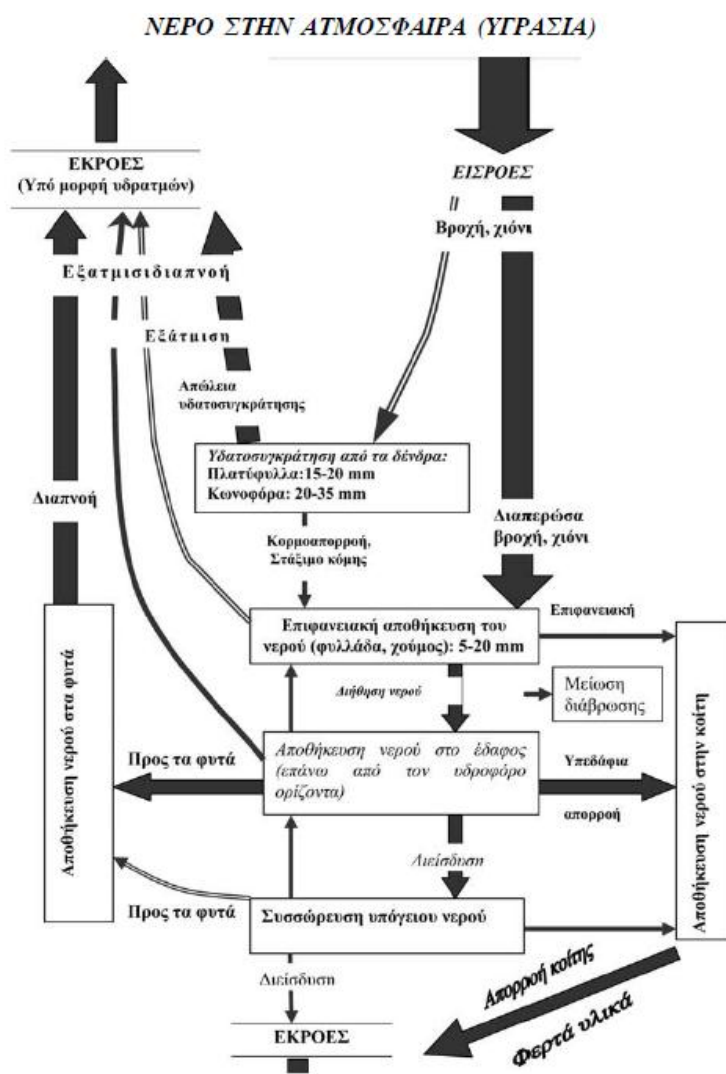
Ο Υδρολογικός κύκλος περιγράφει τη συνεχή ανακύκλωση του νερού μεταξύ της ατμόσφαιρας του εδάφους και των ωκεανών. Πρακτικά δεν έχει αρχή και τέλος αλλά συνήθως τοποθετείται στην ατμόσφαιρα όπου το νερό βρίσκεται υπό τη μορφή υδρατμών. Το νερό φθάνει στην επιφάνεια της γης με τη μορφή κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι ή χαλάζι), ένα μέρος αυτού εξατμίζεται κατά την πτώση και επιστρέφει στην ατμόσφαιρα, ενώ το μεγαλύτερο φθάνει στο έδαφος, όπου είτε διηθείται στα βαθύτερα στρώματα εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφορείς, είτε ρέει επιφανειακά προς τις χαμηλότερες περιοχές και οδηγείται έτσι στους ποταμούς, τις λίμνες και τις θάλασσες.

Το ιδιαίτερο μεσογειακό κλίμα της Ελλάδας, με την ανισοκατανομή των κατακρημνισμάτων (κυρίως των βροχοπτώσεων) και την εμφάνιση πολλών δασικών πυρκαγιών κατά τη διάρκεια του έτους, προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα όπως πλημμύρες, διαβρώσεις, μεταφορά φερτών υλικών, ολισθήσεις, γεωκατακρημνίσεις, κ.α. Όλα αυτά εξελίσσονται και μεγεθύνονται στις λεκάνες απορροής και τις κοίτες των χειμάρρων (Εικόνα 1).

Οι κύριες υδρολογικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τον υδρολογικό κύκλο είναι:

- Επιφανειακή απορροή (surface runoff): σχηματισμός ρεμάτων και ποταμών με κατάληξη στη θάλασσα.
- Υπόγεια απορροή (groundwater runoff): το μέρος των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων το οποίο πέφτοντας στο έδαφος διηθείται (infiltration) εντός αυτού μέσω εδαφικών πόρων και ρωγμών.

- Κατακρήμνιση (precipitation): το νερό σε διάφορες μορφές (βροχή, χιόνι, πάγος) φθάνει από την ατμόσφαιρα, στη θάλασσα και στην ξηρά.
- Εξάτμιση (evaporation): μεταφορά του νερού από γήινες και υδάτινες επιφάνειες με τη μορφή υδρατμών.
- Παρεμπόδιση (interception): μέρος των κατακρημισμάτων που αναχαιτίζεται από τη κόμη των δασών, την υποβλάστηση, το δασικό τάπητα ή άλλες μορφές κάλυψης γης της λεκάνης απορροής.
- Κατακράτηση (depression): συγκράτηση του νερού στις εδαφικές κοιλότητες.
- Διήθηση (infiltration): εισχώρηση του νερού από την επιφάνεια στα βαθύτερα στρώματα του εδάφους.



Εικόνα 1: Υδρολογικές διεργασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή στο στόμιο μιας δασωμένης λεκάνης απορροής. (Μπαλούτσος, et al., 2001)



### 1.4.3 Το Υδρολογικό ισοζύγιο

Οι διαφορές που προκύπτουν από την κατανομή του νερού στον πλανήτη, αντανακλούν στις διαφορές που εμφανίζουν τα χαρακτηριστικά του υδρολογικού κύκλου από περιοχή σε περιοχή. Τα χαρακτηριστικά του υδρολογικού κύκλου οποιασδήποτε περιοχής, μπορούν να εκφραστούν ποσοτικά ως υδατικό ή υδρολογικό ισοζύγιο.

Το υδρολογικό ή υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής είναι η μαθηματική έκφραση του υδρολογικού της κύκλου. Εκφράζεται εξισώνοντας τη διαφορά μεταξύ της εισροής και της εκροής σε μια λεκάνη απορροής, με το ρυθμό αλλαγής της αποθήκευσης του νερού στη λεκάνη  $\Delta S$  σε καθορισμένο χρόνο  $\Delta t$  (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006). Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αποτελούν, σε μια λεκάνη απορροής, τη βασική εισροή και οι κύριες μορφές τους μπορεί να είναι βροχή, χιόνι ή χαλάζι. Η επιφανειακή, η ενδιάμεση και η υπόγεια απορροή καθώς επίσης η εξάτμιση, η διαπνοή και η διήθηση συνιστούν την εκροή σε ένα υδατικό ισοζύγιο. Τέλος, η αποθήκευση μιας δασικής λεκάνης απορροής συνίσταται στο μέρος του νερού που αποθηκεύεται στα επιφανειακά στρώματα (επιφανειακή), εντός του ριζικού συστήματος (υπεδάφια), μέσα στους υδροφορείς (υπόγεια) και στην παρεμπόδιση του από τη φυτοκόμη και το δασικό τάπητα.

Η απλοποιημένη εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου σε μια μικρή, ορεινή, δασική λεκάνη απορροής, όπως αυτή που μελετάται, είναι:

$$P = Q + ET \pm \Delta S, (1)$$

Σύμφωνα με αυτή, το  $P$  αντιπροσωπεύει τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που πέφτουν στη λεκάνη, το  $Q$  την ποσότητα του νερού που απορρέει στα επιφανειακά στρώματα της λεκάνης, το  $ET$  την εξατμισοδιαπνοή και το  $\Delta S$  τις όποιες μεταβολές παρατηρούνται στην υγρασία του εδάφους και των πετρωμάτων της λεκάνης.

Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες (Μπουρλέτσικας, 2004) χρησιμοποιείται η απλοποιημένη μορφή δεδομένου ότι η μορφολογία και η υδρολογική δίαιτα της λεκάνης, παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Έχει μικρή έκταση (1,235 km<sup>2</sup>) και παρουσιάζει σχετική ομοιομορφία τόσο ως προς την τοπογραφία και γεωλογία, όσο και ως προς τις υδροκλιματικές συνθήκες.
- Βρίσκεται σε φυσική κατάσταση χωρίς τεχνικά έργα αξιοποίησης του υδατικού δυναμικού της που να επηρεάζουν την υδρολογική δίαιτα.
- Δεν έχει αξιόλογους υπόγειους υδροφορείς, ούτε παρουσιάζει υπόγειες εισροές ή εκροές από ή προς γειτονικές λεκάνες.

- Δεν παρουσιάζει αξιόλογες χιονοπτώσεις κατά τη διάρκεια του χειμώνα.
- Σε ετήσια βάση η μεταβλητή ΔS μπορεί να θεωρηθεί σταθερή.

## 1.5 Το ζήτημα των πλημμυρών

### 1.5.1. Γενικά

Οι πλημμύρες είναι ένα φυσικό φαινόμενο που οφείλεται συνήθως σε κλιματολογικές συνθήκες και στη μορφολογία του εδάφους. Αποτελούν τη δεύτερη πιο συχνή φυσική καταστροφή μετά τις δασικές πυρκαγιές. Εκδηλώνονται είτε ως βραδείας εξέλιξης πλημμύρες, που δεν προκαλούν μεγάλες καταστροφές και μπορούν εύκολα να προβλεφθούν και να ελεγχθούν, είτε ως ξαφνικά γεγονότα με δυσμενείς συνέπειες και για το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον.

Τις τελευταίες δεκαετίες, το μέγεθος και η ένταση των πλημμυρών έχει προκαλέσει ιδιαίτερη ανησυχία, αφού έχουν χαθεί αρκετές ανθρώπινες ζωές και έχουν καταγραφεί αρκετές υλικές και οικονομικές ζημιές.

Η Κοινοτική Οδηγία 2007/60/EK ορίζει την πλημμύρα ως την προσωρινή κάλυψη του εδάφους από το νερό, το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν υφίσταται. Όταν η παροχή του νερού σε ένα υδατόρευμα, αυξηθεί σε τέτοια επίπεδα ώστε να ξεπερνά τα φυσικά ή τεχνητά πρηνή, η στάθμη του νερού ανυψώνεται, με αποτέλεσμα τον κατακλυσμό με νερό των γειτονικών περιοχών.

Η αυξημένη παροχή των υδατορευμάτων οφείλεται κυρίως είτε σε γεγονότα έντονης και μακράς διάρκειας βροχόπτωσης είτε στο ξαφνικό λιώσιμο των πάγων. Οι αιτίες ανεπαρκούς διοχέτευσης του νερού από το ποτάμιο σύστημα είναι:

- Η μικρή υγρή διατομή του ποταμού
- Η μικρή κλίση του πυθμένα
- Η μεγάλη τραχύτητα του ποταμού εξαιτίας εμποδίων και φερτών υλών
- Το μικρό ύψος του ποταμού στα πλημμυρικά πεδία και κατά συνέπεια μεγάλη βρεχόμενη περίμετρος με αποτέλεσμα τις μικρές ταχύτητες ροής
- Οι υψηλές στάθμες κατάντη (στάθμη κύριου υδατορεύματος, στάθμη θάλασσας) (Μαμάσης, 2012).

Η εμφάνιση των πλημμυρών αποτελεί ένα αρκετά πολύπλοκο φαινόμενο στο οποίο υπεισέρχονται διάφορες και πολύπλοκες φυσικές και τεχνικές διεργασίες. Η εμφάνιση βροχοπτώσεων μεγάλης έντασης, η αύξηση του συντελεστή απορροής σε συνδυασμό με τη μείωση του χρόνου συγκέντρωσης και παράλληλα η μείωση της παροχετευτικής ικανότητας και η αύξηση της έντασης πολλών δραστηριοτήτων στο

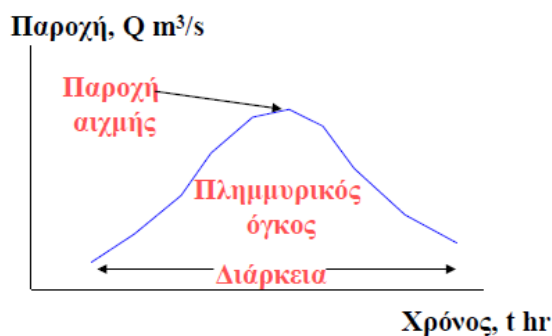
πλημμυρικό πεδίο έχουν ως συνέπεια την αύξηση του πλημμυρικού κινδύνου στην ευρύτερη περιοχή.

Οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου οι οποίες εμπλέκονται με τη δημιουργία μιας πλημμύρας είναι:

- Η βροχόπτωση προκαλώντας την επιφανειακή απορροή.
- Η κατακράτηση από τη φυτοκάλυψη και το έδαφος, η οποία επιβραδύνει τη βροχή και μετατρέπει το μεγαλύτερο μέρος σε εξάτμιση.
- Η εξάτμισοδιαπνοή από τις λίμνες, το έδαφος και τα φυτά, η οποία είναι ασήμαντη όταν πέφτει η βροχή αλλά γίνεται σημαντική στη συνέχεια.
- Η διήθηση του εδάφους, η οποία συγκρατεί το νερό εντός των εδαφικών κοιλοτήτων.
- Η βαθειά διήθηση προς τους υπόγειους υδροφορείς, όπου το νερό επιστρέφει ως επιφανειακή απορροή στο υδατόρευμα, με σημαντική όμως χρονική υστέρηση.

Για την ποσοτική εκτίμηση μιας πλημμύρας πρέπει να ληφθούν υπόψη τα κύρια μεγέθη της που σε φυσικό πλαίσιο είναι (Εικόνα 2):

- Η παροχή της αιχμής
- Ο πλημμυρικός όγκος
- Η χρονική διάρκεια



Εικόνα 2: Τα τρία κύρια μεγέθη σε μια πλημμύρα (Μαμάσης, 2012)

Ωστόσο, εξίσου σημαντικό ρόλο, για την ποσοτική εκτίμηση μιας πλημμύρας σε μια λεκάνη απορροής παίζουν η στάθμη που θα έχει φτάσει το νερό εντός του υδατορεύματος και το εμβαδόν των εκτάσεων που θα έχουν κατακλυστεί από αυτή. Τα μεγέθη των πλημμυρών που συνδέονται με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος λεκάνης απορροής είναι:

- Η βροχόπτωση (συνολικό ύψος, ένταση, διάρκεια)

- Η μορφολογία της λεκάνης απορροής και τα υδρολογικά μεγέθη που πηγάζουν από αυτήν (έκταση, συντελεστής απορροής, χρόνος συρροής)
- Τα υδατορεύματα (διατομή, κλίση, τραχύτητα, κατάντη στάθμες) (Μαμάσης, 2012)

Σημείο εκκίνησης για το φυσικό φαινόμενο, που ονομάζεται πλημμύρα είναι η εμφάνιση ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται από την αλλοίωση των γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών των λεκανών απορροής, ενώ η επίδρασή της αυξάνεται όσο εντείνεται η ανθρώπινη δραστηριότητα στα λεγόμενα πλημμυρικά πεδία. Οι καταστροφικές πλημμύρες θέτουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές, ενώ προκαλούν βαριές οικονομικές απώλειες και σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

### **1.5.2. Αίτια των πλημμυρών**

Όπως προαναφέρθηκε, μια πλημμύρα γεννάται από τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στον υδρολογικό κύκλο, οι οποίες κατ' ουσία, δεν μπορούν να ελεγχθούν. Ωστόσο, οι γεωλογικές, γεωμορφολογικές και εδαφολογικές συνθήκες εντός της λεκάνης είναι δυνατόν να τροποποιηθούν με ανθρώπινες ενέργειες. Το κύριο φυσικό αίτιο είναι μια ισχυρή καταιγίδα, ιδιαίτερα σε περιόδους υγρές, όπου το έδαφος έχει σχετικά μικρή διηθητική ικανότητα.

Εντούτοις, το εάν μια δεδομένη βροχόπτωση, θα έχει δυσμενείς επιπτώσεις λόγω πλημμύρας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των ανθρωπογενών παρεμβάσεων στο φυσικό περιβάλλον και κατ' επέκταση στη φυσιολογική λειτουργία των υδρολογικών συστημάτων. Οι παρεμβάσεις αυτές επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον των παραποτάμιων περιοχών.

Τέτοιες είναι η εντατική αστικοποίηση περιοχών με κατάληψη του φυσικού τους περιβάλλοντος, η αποδάσωση των ανάντη τμημάτων της λεκάνης απορροής είτε από αποψίλωση, είτε λόγω εκδήλωσης δασικών πυρκαγιών εντός της λεκάνης με αποτέλεσμα να μειωθεί η παρεμπόδιση και η κατακράτηση από τη βλάστηση και να αυξηθεί η επιφανειακή απορροή. Επιπλέον, στην εμφάνιση πλημμύρας λειτουργούν η ευθυγράμμιση της ροής των ποταμών, η ανεπαρκής αποστράγγιση, η εξάλειψη των φυσικών πεδίων κατάκλισης, αφού έχουν καταληφθεί από ανθρωπογενείς δραστηριότητες οι οποίες δεν είναι προσαρμοσμένες σε γεγονότα πλημμύρας και τέλος η οικοδόμηση κατασκευών και κτιρίων σε πλημμυρικά πεδία .

Συνοψίζοντας, σε μια δεδομένη βροχόπτωση οι ζημιές που θα προκληθούν λόγω πλημμύρας εξαρτώνται κυρίως από:

- Την παρουσία αντιπλημμυρικών έργων στην ευρύτερη περιοχή

- Την αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος με αποτέλεσμα αύξηση του πλημμυρικού όγκου και μείωση χρόνου συρροής.
- Την ένταση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε περιοχές που απειλούν πεδία πλημμύρων με κάποια πιθανότητα.

### **1.5.3. Αντιμετώπιση των πλημμυρών**

Στο παρελθόν έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες ώστε αν αντιμετωπιστούν οι καταστροφικές συνέπειες των πλημμυρών. Το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτών είναι ότι αντιμετωπιζόνταν σε τοπικό επίπεδο και όχι ανάντη και κατόντη του ποταμού. Πλέον, η διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου ανάγεται στην ολοκληρωμένη διαχείριση των λεκανών απορροής των ποταμών. Η εύρεση της κατάλληλης διαχείρισης, έγκειται στο γεγονός αντιμετώπισης του προβλήματος με βάση μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στα πλαίσια της διεπιστημονικότητας, με εμπλοκή αρμόδιων φορέων έτσι ώστε να υπάρξουν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Η αντιμετώπιση των πλημμυρών γίνεται με μια σειρά μέτρων που διακρίνονται σε:

- Κατασκευαστικά ή μη κατασκευαστικά.
- Με το αν προστατεύουν συγκεκριμένες υποδομές ή ευρύτερα μεγαλύτερες περιοχές
- Με το αν έχουν σκοπό να διαφοροποιήσουν την πλημμύρα, να μειώσουν την ευπάθεια σε πλημμύρα ή να μειώσουν την επίδραση της πλημμύρας (Μαμάσης,2012).

Τα αντιπλημμυρικά έργα έχουν ως κύριους στόχους την αποθήκευση του νερού και την ασφαλή παροχέτευση και καθοδήγηση των πλημμυρικών παροχών. Τα κατασκευαστικά μέτρα ενισχύουν τη μεταφορά του νερού σε άλλες περιοχές. Δεδομένου όμως ότι οι κατασκευές είναι τρωτές στις πλημμύρες (αφού έχουν σχεδιαστεί και με κάποια πιθανότητα αστοχίας) θα πρέπει να συνοδεύονται και από άλλα μη κατασκευαστικά μέτρα.

Παραδείγματα κατασκευαστικών έργων είναι : αντιπλημμυρικοί ταμιευτήρες στα ανάντη της λεκάνης, αναχώματα και προστατευτικοί τοίχοι, λεκάνες κατάκλισης δίπλα στο ποτάμι ώστε να γίνεται ανακούφιση της πλημμυρικής αιχμής προστατεύοντας τις κατόντη περιοχές, δίκτυα όμβριων για γρήγορη και ασφαλή αποστράγγιση τόσο της λεκάνης όσο και του αστικού τμήματος που προστατεύει.

Ως μη κατασκευαστικά μέτρα αντιπλημμυρικής προστασίας ορίζονται τα μέτρα αυτά τα οποία αφορούν τον τρόπο πρόληψης και μετρίασης εμφάνισης μεγάλων πλημμυρικών αιχμών, προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος και τρόπους πρόγνωσης και οργάνωσης των μηχανισμών προστασίας σε θέματα ενημέρωσης καθώς και αποκατάστασης των βλαβών που υπέστησαν οι υποδομές.

Παραδείγματα μη κατασκευαστικών μέτρων είναι: η διατήρηση και επέκταση των δασών στις ορεινές περιοχές της λεκάνης απορροής, η διατήρηση των υγροτόπων και των πλημμυρικών πεδίων από ανθρώπινες παρεμβάσεις και χρήσεις ώστε οι φυσικές ζώνες να καθυστερούν τη ροή, η διατήρηση των μαιάνδρων των ποταμών και των φυσικών συνδέσεων τους με τις πλημμυρικές περιοχές. Επίσης σημαντική συνεισφορά στην αντιπλημμυρική προστασία έχουν ο έλεγχος και συντήρηση των δικτύου όμβριων υδάτων στις αστικές περιοχές, η χρήση ιστορικών πληροφοριών και ανάπτυξη συστημάτων πρόγνωσης καταιγίδων και μοντέλων βροχής απορροής και συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης του κοινού με μηχανισμούς διαρκούς ενημέρωσης.

Τέλος, λόγω του ότι η υπό μελέτη λεκάνη έχει ορεινό χαρακτήρα και τα πλημμυρικά φαινόμενα εξελίσσονται και μεγεθύνονται στις λεκάνες απορροής και στις κοίτες των χειμάρρων κρίνεται αναγκαία, η κατασκευή έργων Ορεινής Υδρονομίας.

#### **1.5.4. Ορεινά Υδρονομικά Έργα**

Ως ορεινά υδρονομικά έργα (έργα διευθέτησης ορεινών υδάτων) χαρακτηρίζονται τα κατάλληλα και προσαρμοσμένα μέτρα και επεμβάσεις, όπου σχεδιάζονται ώστε να αποτρέπονται βλαπτικές επιδράσεις απέναντι στον άνθρωπο και το φυσικό περιβάλλον και να αξιοποιείται ορθολογικά το τρεχούμενο νερό (Παυλίδης, 2007). Για το λόγο αυτό τα υδρονομικά έργα εκτός από βασικά έργα υποδομής ,αποτελούν από τη φύση τους έργα κατεξοχήν περιβαλλοντικά.

Πρόκειται για ένα σύστημα τεχνικών, αγροτεχνικών ή γεωτεχνικών, βιοτεχνικών (φυτοτεχνικά και φυτοκομικά) έργων που αποτρέπουν την πλημμυρογένεση, τη διάβρωση των εδαφών και τη μεταφορά υλικών διαμέσου των κοιτών. Ο χώρος εφαρμογής των έργων ορεινής υδρονομικής αποτελεί το σύνολο των τμημάτων των χειμάρρων και των αποδεκτών τους (ποταμοί, λίμνες, θάλασσες), που ενεργοποιούνται ή ασκούνται οι ζημιογόνες χειμαρρικές λειτουργίες και ιδιότητες (Παυλίδης, 2007).

Τα έργα ορεινής υδρονομίας, θα πρέπει να προσαρμόζονται εύκολα στη μορφολογία του υδατορεύματος, κάτι το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με τη δημιουργία κατασκευών από φυτικά και δασικά είδη, περιμετρικά της λεκάνης απορροής. Βασικό χαρακτηριστικό των ορεινών έργων διευθέτησης είναι η χρήση υλικών που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή και σπάνια συναντώνται στα τεχνικά έργα. Συνεπώς μειώνεται σημαντικά το κόστος κατασκευής, ενώ ταυτόχρονα είναι περισσότερο φιλικά και αρμονικά δεμένα με το φυσικό περιβάλλον.

Τα έργα διευθέτησης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες : Τα γραμμικά και τα επιφανειακά ή έργα επιφάνειας. Τα γραμμικά έργα καλούνται να αντιμετωπίσουν

γραμμικής φύσης ζημιόγωνα φαινόμενα όπως διαβρώσεις ή τοπικά πλημμυρικά φαινόμενα, δρουν είτε μεμονωμένα είτε σε συνδυασμό και διακρίνονται σε φυτοτεχνικά, φυτοκομικά, αγροτεχνικά και τεχνικά (Παυλίδης, 2007). Τα τεχνικά διακρίνονται περαιτέρω σε εγκάρσια και σε παράλληλα. Στα φυτοκομικά περιλαμβάνονται φυτεύσεις ειδών τοποθετημένες σε γραμμική διάσταση. Τα φυτοτεχνικά έργα είναι κατά κύριο λόγο γραμμικά και διακρίνονται σε κλαδοπλέγματα, φακελώματα, ξυλοφράγματα ή κορμοφράγματα, κορμοθέματα. Τέλος, τα γραμμικά αγροτεχνικά έργα είναι η διάνοιξη τάφρων και διωρύγων και η διαμόρφωση βαθμίδων.

Από την άλλη τα επιφανειακά έργα αφορούν την αντιμετώπιση των χειμαρικών φαινομένων που πραγματοποιούνται σε εκτεταμένες επιφάνειες ( λεκάνες απορροής ή τμήματα τους.) Είναι κατά κύριο λόγο φυτοκομικά έργα όπως δασώσεις και αναδασώσεις καμένων εκτάσεων για δημιουργία υδρογεωνομικών δασών, θαμνώσεις και αναθαμνώσεις για ίδρυση προστατευτικών θαμνώνων, καθώς και διαχειριστικά, καλλιεργητικά και διοικητικά μέτρα δασοσυστάδων ή θαμνοσυστάδων με στόχο την αύξηση της υδρογεωνομικής τους επίδρασης. Τέλος τα αγροτεχνικά έργα επιφάνειας αφορούν την κατεργασία και προετοιμασία εδαφών, τις επιχώσεις εδαφών, τους μετασχηματισμούς, μεταπλάσεις και διαμορφώσεις εδαφών (Κωτούλας, 2001).

Γενικά οι μέθοδοι βιοτεχνικής διευθέτησης μπορεί να έχουν ως αντικείμενο την σταθεροποίηση των ασταθών εδαφών, την διευθέτηση των εστιών παραγωγής φερτών υλών, την διευθέτηση στον ευρύτερο χώρο των λεκανών απορροής των χειμαρικών ρευμάτων καθώς και τις φυτοτεχνικές διευθετήσεις σε ειδικές περιπτώσεις (οδοποιία, μείωση της όχλησης από θορύβους, λιθοκατακρημνίσεις, κλπ.). Δεν αντικαθιστούν σε καμία περίπτωση την παραδοσιακή υδραυλική ή γεωτεχνική μηχανική (π.χ. σκυρόδετα φράγματα), αλλά συμπληρώνουν και βελτιώνουν τις τεχνικές μεθόδους της εφαρμοσμένης μηχανικής, ενώ ταυτόχρονα συνδυάζονται τεχνικές με βιολογικές επιστήμες (Donat, 1995).

Τα φυτοτεχνικά έργα εκτελούνται σε εξαιρετικά ευαίσθητες και προβληματικές θέσεις των λεκανών απορροής των χειμαρικών ρευμάτων και των ευρύτερων περιοχών τους. Κατά την εκτέλεση τους, απαιτείται συχνά και η συνδρομή των τεχνικών και αγροτεχνικών έργων, λόγω των δυσχερειών και των δυσμενών συνθηκών του περιβάλλοντος. Απαιτούν επίσης την εφαρμογή ειδικής τεχνικής ώστε σε σύντομο χρονικό διάστημα, να επιτευχθούν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Τα φυτοκομικά έργα εκτελούνται στην ευρύτερη περιοχή των λεκανών απορροής, όπου οι περιβαλλοντικές συνθήκες επιτρέπουν την εγκατάσταση της δασικής βλάστησης, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα (Μάρης, 2013).

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι είτε ολόκληρα φυτά, είτε μέρη αυτών σε συνδυασμό με άλλα «νεκρά» δομικά υλικά ( κορμοί και κλάδοι δένδρων, λίθοι, συρματοπλεγμα κ.α.).

Οι διευθετήσεις ορεινών υδάτων με τη χρήση φυτοτεχνικών έργων παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως:

1. Μικρή δαπάνη κατασκευής και συντήρησης,
2. Βελτίωση και φροντίδα του περιβάλλοντος των βιοτόπων
3. Βελτίωση συνθηκών εδαφικής υγρασίας μέσω της κατακράτησης, της εξατμισοδιαπνοής και της αποθήκευσης
4. Δεν υπόκεινται μετά την κατασκευή τους σε αποσάθρωση και κατατριβή όπως τα τεχνικά έργα, αντίθετα αυξάνουν με την πάροδο του χρόνου τη σταθερότητα και την αποδοτικότητά τους και είναι δυνατό να παραμένουν, με ορισμένες προϋποθέσεις, για πάντα αποδοτικά
5. Αποτελούν προσαρμοσμένες κατασκευές στο περιβάλλον και υπερτερούν έναντι των τεχνικών από αισθητικής άποψης.
6. Προστασία ενάντια στην επιφανειακή διάβρωση.  
(Μάρης, 2013), (Donat, 1995).

Ωστόσο παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα:

1. Με τα φυτοτεχνικά έργα γενικά δεν είναι δυνατό να επιλυθούν όλα τα προβλήματα, τα οποία αντιμετωπίζονται με τα τεχνικά έργα.
2. Η επίδραση των φυτοτεχνικών έργων είναι μικρή αρχικά, αμέσως μετά το τέλος της κατασκευής τους, αυξανόμενη όμως με την πάροδο του χρόνου, σε αντίθεση με την επίδραση των τεχνικών έργων, η οποία είναι πλήρης από την αρχή της κατασκευής τους.
3. Οι φυτοτεχνικές κατασκευές απαιτούν γενικά περισσότερο χώρο σε σχέση με τις τεχνικές (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Β' έκδοση - Νέα έργα, 2006).

## **1.6 Θεσμικό πλαίσιο για τα νερά**

### **1.6.1. Οδηγίες του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου**

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, κατανοώντας τη σημασία του υδάτινου περιβάλλοντος, προχώρησε στη διαμόρφωση ολοκληρωμένης κοινοτικής πολιτικής στον τομέα των υδάτων. Έτσι, έπειτα από μια σειρά διαβουλεύσεων, στην προσπάθειά του, να θεσπίσει νόμους για την προστασία και τη διαχείριση των υδάτων, διαμόρφωσε την Οδηγία-Πλαίσιο για τα νερά 2000/60/ΕΚ και την Οδηγία Πλαίσιο 2007/60/ΕΚ για την αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.



### **1.6.2. Οδηγία 2000/60/ΕΚ**

Στις 23 Οκτωβρίου του 2000, το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης θέσπισε τις βασικές αρχές για μια ολοκληρωμένη πολιτική για την προστασία των υδάτων στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα. Έπειτα από μακρόχρονες συζητήσεις και διαβουλεύσεις των κρατών μελών τέθηκε σε ισχύ στις 23 Δεκεμβρίου του 2000.

Σκοπός της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ (Water Framework Directive-WFD) είναι η θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης για την προστασία των εσωτερικών, επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων το οποίο:

- Να αποτρέπει την περαιτέρω επιδείνωση, να προστατεύει και να βελτιώνει την κατάσταση των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς και των χερσαίων οικοσυστημάτων και υγροτόπων, που εξαρτώνται άμεσα από αυτά για την κάλυψη των αναγκών τους σε νερό.
- Να προωθεί τη βιώσιμη χρήση του νερού βάσει μακροπρόθεσμης προστασίας των διαθέσιμων υδατικών πόρων.
- Να αποσκοπεί στην ενίσχυση της προστασίας και τη βελτίωση του υδάτινου περιβάλλοντος με τέτοια μέτρα ώστε να μειώνεται προοδευτικά η απόρριψη, εκπομπή και διαρροή βλαβερών ουσιών σε αυτό.
- Να διασφαλίζει την προοδευτική μείωση της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων και να αποτρέπει την περαιτέρω μόλυνσή τους.
- Να συμβάλλει στο μετριασμό των επιπτώσεων από πλημμύρες και ξηρασίες.

και να συμβάλλει με αυτό τον τρόπο στην εξασφάλιση επαρκούς παροχής επιφανειακού και υπόγειου νερού καλής ποιότητας που απαιτείται για τη βιώσιμη, ισόρροπη και δίκαιη χρήση ύδατος, σε σημαντική μείωση της ρύπανσης υπογείων υδάτων, στην προστασία των χωρικών και θαλάσσιων υδάτων και στην επίτευξη των στόχων των σχετικών διεθνών συμφωνιών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που αποσκοπούν στην πρόληψη και την εξάλειψη της ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Το πλέον καινοτόμο στοιχείο της Οδηγίας είναι ότι θεσπίζει την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Χρησιμοποιείται δηλαδή η Λεκάνη Απορροής Ποταμού για όλες τις ενέργειες σχεδιασμού και διαχειριστικής δράσης που έχουν να κάνουν με το νερό.

Τα κυριότερα σημεία της συνοψίζονται παρακάτω (Μαμάσης, 2012):

- Ο προσδιορισμός της λεκάνης απορροής ποταμού ή συνόλου λεκανών απορροής με τη μορφή μιας υδρολογικής περιφέρειας (με συνυπολογισμό των υπόγειων και των παράκτιων νερών) και οι διοικητικές διευθετήσεις

για τη συγκρότηση αρμόδιας τοπικής αρχής και συντονισμού δράσεων για τη λεκάνη.

- Ο χαρακτηρισμός και η συνολική περιγραφή της κατάστασης της υδρολογικής περιφέρειας και η ανάλυση των πιέσεων και των επιπτώσεων αυτών στην κατάσταση των συστημάτων επιφανειακών και υπόγειων υδάτων συμπεριλαμβανομένης και της οικονομικής ανάλυσης των χρήσεων νερού.
- Η εγκατάσταση και λειτουργία αντιπροσωπευτικών δικτύων παρακολούθησης της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης υδάτων.
- Η κατάστρωση των Διαχειριστικών Σχεδίων (Προγράμματα Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού), που θα περιλαμβάνουν τα απαραίτητα διαχειριστικά μέτρα για την επίτευξη των στόχων της οδηγίας.

Προκειμένου, να εφαρμοστεί και να υλοποιηθεί η οδηγία, συμφωνήθηκε κοινή προσέγγιση από όλα τα Κράτη Μέλη, με πρακτικές που θα έχουν διεπιστημονικό χαρακτήρα και θα επιτρέπουν έτσι την ανταλλαγή γνώσεων και εμπειρίας, ούτως ώστε να ανταπεξέλθουν στο χρονοδιάγραμμα που είχε αρχικά τεθεί.

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας Χρονοδιαγράμματος υλοποίησης της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ:

Πίνακας 1: Χρονοδιάγραμμα υλοποίησης της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ (Μπαριάμης, 2013)

Έτος	Θέμα	Αναφορά στην Οδηγία 2000/60/ΕΚ
2000	Η Οδηγία τέθηκε σε ισχύ	Άρθρο 25
2003	Ενσωμάτωση στο Εθνικό Δίκαιο	Άρθρο 23
	Προσδιορισμός των Λεκάνων Απορροής Ποταμού και Αρμοδίων Αρχών	Άρθρο 3
2004	Χαρακτηρισμός της λεκάνης απορροής ποταμού: πιέσεις, επιπτώσεις και οικονομική ανάλυση	Άρθρο 5
2006	Εγκατάσταση δικτύου παρακολούθησης	Άρθρο 8
	Έναρξης δημόσιας διαβούλευσης (το αργότερο)	Άρθρο 14
2008	Παρόν Σχέδιο Διαχείρισης Λεκάνης Απορροής Ποταμού (ΣΔΛΑΠ)	Άρθρο 13
2009	Οριστικοποίηση ΣΔΛΑΠ συμπεριλαμβανομένου και του προγράμματος μέτρων	Άρθρα 13 & 11
2010	Καθιέρωση πολιτικών τιμολόγησης	Άρθρο 9
2012	Κατάρτιση επιχειρησιακών προγραμμάτων μέτρων	Άρθρο 11
2015	Επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων	Άρθρο 4
	Τέλος πρώτης διαχειριστικής περιόδου	
	Δεύτερο ΣΔΛΑΠ και πρώτο σχέδιο διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου	
2021	Τέλος δεύτερης διαχειριστικής περιόδου	Άρθρα 4 & 13
2027	Τέλος τρίτης διαχειριστικής περιόδου, τελική διορία επίτευξης στόχων	Άρθρα 4 & 13

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή όφειλε να δημοσιεύσει μια αναφορά προόδου υλοποίησης της Οδηγίας έως τα τέλη του 2012 και για κάθε έξι (6) χρόνια εφεξής, καθώς επίσης να την υποβάλει και προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο.

Ο παρακάτω Πίνακας 2 παρουσιάζει συνοπτικά την παρούσα κατάσταση:

Πίνακας 2: Παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα για την Οδηγία 2000/60.

Υδατικό Διαμέρισμα	Έναρξη Διαβούλευσης	Λήξη Διαβούλευσης	Έγκριση ΣΔΔΠ
Δυτική Πελοπόννησος (GR01)	21/11/2011	21/12/2012	Εγκεκριμένο
Βόρεια Πελοπόννησος (GR02)	21/11/2011		
Ανατολική Πελοπόννησος (GR03)	21/11/2011		
Δυτική Στερεά Ελλάδα (GR04)	15/10/2011		
Ήπειρος (GR05)	15/10/2011		Εγκεκριμένο
Αττική (GR06)	13/1/2012		
Ανατολική Στερεά Ελλάδα (GR07)	13/1/2012		
Θεσσαλία (GR08)	15/10/2011		
Δυτική Μακεδονία (GR09)	30/7/2012	13/12/2013	Εγκεκριμένο
Κεντρική Μακεδονία (GR10)	30/7/2012		
Ανατολική Μακεδονία (GR11)	18/11/2011	21/12/2012	
Θράκη (GR12)	18/11/2011		
Κρήτη (GR13)	11/7/2013	-	
Νήσοι Αιγαίου (GR14)	Θα ανακοινωθεί	-	

### 1.6.3. Οδηγία 2007/60/ΕΚ

Προκειμένου να υπάρχει ένα πιο ολοκληρωμένο σχέδιο όσον αφορά τη διαχείριση των υδατικών πόρων, η Ευρωπαϊκή Ένωση, το Σεπτέμβριο του 2007, ενέκρινε μια συμπληρωματική Οδηγία με βασικό άξονα την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων μιας πλημμύρας λαμβάνοντας υπόψη και μελλοντικές αλλαγές στους κινδύνους αυτούς λόγω της αλλαγής του κλίματος.

Κύριος στόχος λοιπόν της Οδηγίας είναι η μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των πλημμυρών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα γενικότερα στα πλαίσια της Κοινότητας.

Η Οδηγία προβλέπει για τα Κράτη Μέλη την τρία βήματα εφαρμογής:

- Αρχικά, ορίζει την διεξαγωγή, ως το τέλος του 2011, προκαταρκτικής αξιολόγησης της πλημμυρικής διακινδύνευσης, για τις λεκάνες απορροής των ποταμών, ούτως ώστε να προσδιοριστούν αυτές που διατρέχουν πιθανότητα, τον πιο σοβαρό κίνδυνο.
- Εν συνεχεία ακολουθεί έως το 2013 η κατάρτιση χαρτών πλημμυρικού κινδύνου και πλημμυρικής διακινδύνευσης, για τις χαρακτηρισμένες περιοχές ως τις πλέον επικίνδυνες. Σ' αυτούς πρέπει να απεικονίζονται οι στάθμες των υδάτων στις περιοχές που κατακλύζονται και να απεικονίζεται ο αριθμός των κατοίκων που δυνητικά βρίσκονται υπό αυτό

τον κίνδυνο, καθώς επίσης η πιθανή περιβαλλοντική και οικονομική βλάβη της περιοχής.

- Τέλος, μέχρι το 2015 οφείλουν να εκπονήσουν τα σχέδια διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης πλήρως καταρτισμένα για αυτές τις περιοχές. Τα σχέδια αυτά πρέπει να περιλαμβάνουν μέτρα που θα ελαχιστοποιούν την πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας καθώς και τις πιθανές επιπτώσεις αυτής. Θα καλύπτουν όλες τις φάσεις το κύκλου διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης, αλλά θα εστιάζουν κυρίως στην:
  - ✓ **Πρόληψη** (π.χ. πρόληψη ζημιών με την αποφυγή κατασκευής κατοικιών και βιομηχανιών σε σημερινές και μελλοντικές περιοχές που είναι επιρρεπείς σε πλημμύρες ή προσαρμογή των μελλοντικών αναπτυξιακών προγραμμάτων με βάση την πλημμυρική διακινδύνευση),
  - ✓ **Προστασία** (με τη λήψη μέτρων μείωσης της πιθανότητας πλημμυρών και/ή τις επιπτώσεις των πλημμυρών σε συγκεκριμένες τοποθεσίες όπως σε υγρότοπους ή πεδίων κατάκλισης υπό αποκατάσταση) και
  - ✓ **Ετοιμότητα** (π.χ. παρέχοντας οδηγίες στο κοινό σχετικά με το τι πρέπει να κάνει σε περίπτωση πλημμύρας)

Τα τρία αυτά στάδια θα επαναλαμβάνονται κάθε 6 χρόνια, συγχρονισμένα με τα βήματα της Οδηγίας Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ με αρχή το έτος 2009, ώστε να εξασφαλιστεί η συνεκτίμηση των μακροπρόθεσμων εξελίξεων. Στις περιπτώσεις διακρατικών λεκανών απορροής ποταμών, για τα στάδια αυτά πρέπει να υπάρξει συντονισμός μεταξύ των εμπλεκόμενων χωρών για να μην μετατεθούν τα προβλήματα από τη μια περιοχή στην άλλη. Τέλος, θα πρέπει να εξασφαλιστεί η ενεργός συμμετοχή όλων των ενδιαφερόμενων μερών στην κατάρτιση και επικαιροποίηση των σχεδίων διαχείρισης κινδύνου πλημμυρών και τα σχέδια, οι εκτιμήσεις και οι χάρτες κινδύνου θα πρέπει να δημοσιοποιούνται.

Η Οδηγία 2007/60/ΕΚ καθορίζει σαφείς καταληκτικές ημερομηνίες για κάθε μία από τις απαιτήσεις που πηγάζουν απ' αυτήν. Οι κυριότερες απ' αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Χρονοδιάγραμμα για την Οδηγία 2007/60 (Μπαριάμης, 2013)

Θέμα	Καταληκτική ημερομηνία	Αναφορά στην Οδηγία 2007/60/ΕΚ
Έναρξη ισχύος	26/11/2007	Εφημερίδα της ΕΕ OJ L 288/2008 Άρθρο 18
Ενσωμάτωση στο εθνικό δίκαιο	26/11/2009	Άρθρο 17
Θέσπιση τεχνικών υποδειγμάτων προκαταρκτικής αξιολόγησης πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2009	Άρθρο 11
Διοικητικές ρυθμίσεις που πρέπει να θεσμοθετηθούν και να ανακοινωθούν στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή	26/5/2010	Άρθρο 3
Λήξη ημ/νιας μεταβατικών μέτρων, για χώρες που είχαν ήδη διενεργήσει ίδια σχέδια αξιολόγησης πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2010	Άρθρο 13
1 <sup>η</sup> Προκαταρκτική αξιολόγηση πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2011	Άρθρα 4 & 5
Έναρξη διαδικασίας δημόσιας συμμετοχής	22/12/2012*	Άρθρα 9.3 & 10
1 <sup>η</sup> Κατάρτιση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2013**	Άρθρο 6
Κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2015***	Άρθρο 7
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2<sup>η</sup> Προκαταρκτική αξιολόγηση πλημμυρικής διακινδύνευσης, ειδική απαίτηση για την κλιματική αλλαγή</li> <li>• 1<sup>η</sup> Αναφορά Υλοποίησης από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή</li> </ul>	22/12/2018	Άρθρα 14.1 & 4
2 <sup>η</sup> Κατάρτιση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και πλημμυρικής διακινδύνευσης	22/12/2019	Άρθρο 14.2
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τέλος του πρώτου κύκλου διαχείρισης πλημμυρικής επικινδυνότητας</li> <li>• 2<sup>η</sup> Κατάρτιση σχεδίων διαχείρισης πλημμυρικής επικινδυνότητας, ειδική απαίτηση για την κλιματική αλλαγή</li> <li>• 3<sup>η</sup> Κατάρτιση ΣΔΛΑΠ βάσει της ΟΠΥ</li> </ul>	22/12/2021	Άρθρα 14.3 & 4

## 1.7 Δασικές πυρκαγιές

Ως δασική πυρκαγιά νοείται κάθε φωτιά που λαμβάνει χώρα στο ύπαιθρο και έχει βλαπτικές επιδράσεις τόσο στα δάση και τις δασικές εκτάσεις όσο και στα λιβάδια, τους βοσκότοπους και τις καλλιέργειες. Είναι ένα φαινόμενο που, κατά κύριο λόγο, εντάσσεται στην κατηγορία των φυσικών καταστροφών. Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα του φυσικού περιβάλλοντος και οι επιπτώσεις τους είναι πλέον παγκόσμιας κλίμακας, αφού αποτελούν κύριες συνιστώσες των τριών μεγαλύτερων περιβαλλοντικών προβλημάτων, του φαινομένου του θερμοκηπίου, της κλιματικής αλλαγής και της ερημοποίησης (Δημητρακόπουλος, 2009).

Η καταστροφή ενός δάσους από πυρκαγιά έχει ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας με υψηλές ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> - ως προϊόντα καύσης της δασικής βιομάζας). Αυξημένη συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα, συνεπάγεται αύξηση της θερμοκρασίας και της ξηρασίας σε παγκόσμιο

επίπεδο, με αποτέλεσμα το γήινο κλίμα να αλλάζει συνεχώς και να γίνεται ολοένα πιο θερμό και ξηρό.

### **1.7.1. Άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών.**

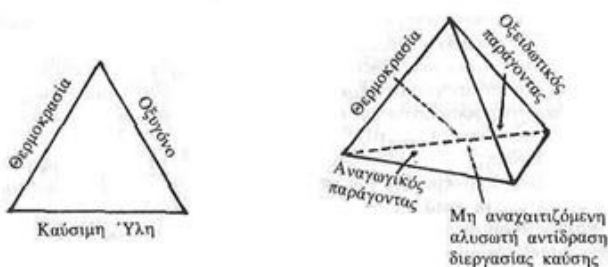
Σε ένα κατ' εξοχήν πυριγενές περιβάλλον, όπως αυτό της Ελλάδας και γενικότερα της Μεσογείου, οι δασικές πυρκαγιές επηρεάζουν δυσμενώς τις επιμέρους οικολογικές λειτουργίες και πολλαπλές χρήσεις του δάσους και ασκούν καθοριστικές επιδράσεις στο φυσικό κύκλο διαδοχής της βλάστησης, στη λειτουργία και δομή των φυσικών οικοσυστημάτων. Παράλληλα, η εκτεταμένη καταστροφή δασικών εκτάσεων έχει έμμεσες επιπτώσεις στην εκδήλωση κατολισθητικών και πλημμυρικών φαινομένων ((Iliadis, et al., 2005), (Paranikolaou, et al., 2009)).

Οι κυριότερες επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών αφορούν κυρίως στα ακόλουθα:

- **Καταστροφή της βλάστησης:** Τα δασικά είδη των χαμηλότερων υψομέτρων της Ελλάδας είναι προσαρμοσμένα στην πυρκαγιά και έχουν τη δυνατότητα άμεσης φυσικής αναγέννησης, με δεδομένο, όμως ότι δεν έχουν καεί επανειλημμένα παλαιότερα. Αντίθετα, τα είδη που απαντώνται σε υψηλότερα υψόμετρα, δεν μπορούν να ανακάμψουν με φυσικό τρόπο μετά από μία πυρκαγιά.
- **Διάβρωση του εδάφους:** Οι υψηλές θερμοκρασίες που επικρατούν σε μία πυρκαγιά, μεταβάλλουν την εδαφική δομή και μειώνουν τη συνοχή του εδάφους. Ταυτόχρονα, η απομάκρυνση της βλάστησης αφήνει το έδαφος απόλυτα εκτεθειμένο στη βροχή και τον αέρα και μειώνει τη δυνατότητα απορρόφησης του νερού. Το αποτέλεσμα είναι ότι τα εδάφη γίνονται πιο ευπαθή, μπορεί να απομακρύνονται από τον άνεμο ή να παρασύρονται από το ορμητικό βρόχινο νερό. Ανάλογα με την κλίση του εδάφους, αυτή η φθορά μπορεί να οδηγήσει τόσο σε σταδιακή απώλεια της εδαφικής κάλυψης - με έντονες συνέπειες στις δυνατότητες αναγέννησης της βλάστησης - ενώ η μειωμένη δυνατότητα απορρόφησης νερού μπορεί να συμβάλει σε φαινόμενα πλημμυρών.
- **Επιπτώσεις στην πανίδα:** Ο τρόπος με τον οποίο οι πυρκαγιές επηρεάζουν την πανίδα είναι ιδιαίτερα σύνθετος και δύσκολα μπορεί να αποτιμηθεί σε γενικό επίπεδο.
- **Αλλαγή του κλίματος και ατμοσφαιρική ρύπανση:** Τα αέρια που εκλύονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς ρυπαίνουν τον ατμοσφαιρικό αέρα και ταυτόχρονα με την καταστροφή της βλάστησης συμβάλλουν στην αλλαγή του μικροκλίματος των περιοχών λόγω της αύξησης της ηλιακής αντανάκλασης του εδάφους.

- **Επιπτώσεις στην πρωτογενή παραγωγή:** Οι επιπτώσεις μιας ανεξέλεγκτης πυρκαγιάς στη γεωργία, την κτηνοτροφία και την υλοτομία, είναι οι πιο συχνές και εμφανείς. (WWF, 2013).

Η έναρξη μιας πυρκαγιάς οφείλεται, κυρίως, σε τρία θεμελιώδη στοιχεία: Το οξυγόνο, τη θερμότητα και την καύσιμη ύλη. Αυτά αποτελούν το λεγόμενο «τρίγωνο της φωτιάς» (Εικόνα 2),



Εικόνα 2: Τρίγωνο της φωτιάς

κατά το οποίο αν ένα στοιχείο εκλείψει δεν δημιουργείται πυρκαγιά. Ωστόσο, υπάρχει και το τρίγωνο συμπεριφοράς της δασικής πυρκαγιάς που αποτελείται από τις μετεωρολογικές συνθήκες, τις τοπογραφικές παραμέτρους και την καύσιμη ύλη. Παρ' όλα αυτά, η εκδήλωση μιας δασικής πυρκαγιάς οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες που σχετίζονται με μετεωρολογικά δεδομένα, τοπογραφικά στοιχεία, τη βλάστηση και την ανθρώπινη δραστηριότητα (Πίνακας 4).

Η μεταβλητότητα του κλίματος θα πρέπει να θεωρείται ο σημαντικότερος παράγοντας επίδρασης στις μεγάλες πυρκαγιές ( (Westerling, et al., 2003), (McKenzie, et al., 2004)) , εξαιρουμένων φυσικά εκείνων των συμβάντων που οφείλονται σε εμπρησμούς (Markalas, 1990).

Μια σειρά από ιδιαίτερα κλιματικά χαρακτηριστικά, όπως η ξηρασία, οι υψηλές θερμοκρασίες κατά τους θερινούς μήνες, η χαμηλή υγρασία αέρα και οι τοπικοί θερινοί άνεμοι ενισχύουν την πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιών στο Μεσογειακό χώρο ((LeHouérou, 1987,), (Tsitsoni, 1997)). Παράλληλα, το είδος και η φύση της βλάστησης (σκληροφυλλική και δάση κωνοφόρων) αλλά και το έντονο ανάγλυφο οδηγούν και αυτά στην ενίσχυση του κινδύνου πυρκαγιάς.

Πίνακας 4: Σημαντικότεροι παράγοντες εκδήλωσης πυρκαγιάς (Xanthopoulos, 2003)

---

- 1. Συμπεριφορά πυρκαγιάς**
  - 2. Καύσιμα**
    - Υγρασία καυσίμων
  - 3. Κλίμα – Καιρικές συνθήκες**
    - Θερμοκρασία
    - Υγρασία αέρα
    - Άνεμος (χαρακτηριστικά, διεύθυνση)
  - 4. Τοπογραφία**
    - Κλίση πρανών
    - Προσανατολισμός πρανών
    - Υψόμετρο
  - 5. Πληθυσμιακή πυκνότητα**
  - 6. Τρωτότητα των κατασκευών**
    - Θέση, σχεδίαση
    - Υλικά κατασκευής (εύφλεκτα υλικά εντός και εκτός κατασκευής)
    - Δυνατότητα κατάσβεσης της πυρκαγιάς
- 

Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, τα παρακάτω χαρακτηριστικά ευνοούν το ξέσπασμα δασικών πυρκαγιών:

- Θερμά καλοκαίρια, τα οποία επηρεάζουν την υγρασία και την υψηλή θερμοκρασία του αέρα και της καύσιμης ύλης
- Ξηρά καλοκαίρια, κατά τα οποία λόγω απουσίας κατακρημνισμάτων, επηρεάζεται η σχετική υγρασία του αέρα και της καύσιμης ύλης
- Ισχυροί καλοκαιρινοί άνεμοι που επηρεάζουν τη σχετική υγρασία και τη διάδοση της πυρκαγιάς
- Έντονη τοπογραφία (Οροσειρά Πίνδου), η οποία βοηθάει την εξάπλωση της πυρκαγιάς και δυσκολεύει αρκετά την κατάσβεση της
- Εύφλεκτη βλάστηση και ιδιαίτερες φυτοκοινωνίες

Ωστόσο, υπάρχουν και θετικές επιδράσεις των δασικών πυρκαγιών στο οικοσύστημα. Μια ελεγχόμενη πυρκαγιά αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη λειτουργία και την εξέλιξη των οικοσυστημάτων, των οποίων αποτελούν βασικό στοιχείο. Τα περισσότερα οικοσυστήματα της Ελλάδας είναι προσαρμοσμένα στη φωτιά και έχουν



τη δυνατότητα φυσικής αναγέννησης μετά από αυτή. Κάτι το οποίο είναι άμεσο και, ταυτόχρονα, αρκετά αποτελεσματικό.

### **1.7.2. Επίδραση δασικών πυρκαγιών στην υδρολογία**

Οι δασικές πυρκαγιές, εκτός των άλλων, επηρεάζουν σημαντικά την υδρολογική συμπεριφορά των λεκανών απορροής. Η καταστροφή των θόλων της βλάστησης και ταυτόχρονα η μείωση των συσσωρευμένων οργανικών φυτικών υπολειμμάτων (χούμος) στην επιφάνεια μιας λεκάνης απορροής από πυρκαγιά, σε συνάρτηση με την εκδήλωση έντονων και ισχυρών βροχοπτώσεων συντελούν:

- Στην αύξηση επιφανειακής απορροής και εμφάνιση διάβρωσης του εδάφους.
- Στην μείωση της διηθητικής ικανότητας του εδάφους.
- Στην αύξηση απωλειών θρεπτικών στοιχείων του εδάφους.
- Στην αύξηση της παροχής στα υδατορεύματα.
- Σε αλλαγές των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του εδάφους.
- Στη δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων τόσο στην ίδια όσο και σε γειτονικές περιοχές.

Είναι γνωστό ότι οι κόμεις των δένδρων και η βλάστηση γενικότερα εμποδίζουν αρχικά την ορμή του νερού ενώ παράλληλα απορροφούν και μέρος αυτού που πέφτει. Έτσι, μια ενδεχόμενη καταστροφή της βλάστησης από πυρκαγιά συνεπάγεται σημαντική μείωση της παρεμπόδισης της βροχής από τα φυτά, κατ'επέκταση μείωση της ικανότητας συγκράτησης του νερού και άρα αύξηση της έντασης και της ποσότητας της επιφανειακής απορροής.

Μελέτες διαχείρισης λεκανών απορροής ανά τον κόσμο έχουν δείξει ότι η συνιστώσα απορροής του υδρολογικού κύκλου, μπορεί να αυξηθεί μετά από αλλαγή στη βλάστηση που επιφέρει μείωση απωλειών λόγω εξατμισοδιαπνοής (Bosch & Hewlett, 1982), (DeBano et al., 1998). Οποιαδήποτε αλλαγή στη σύνθεση και τη δομή της βλάστησης θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της εξατμισοδιαπνοής και την αύξηση της απορροής (Γκόφας, 2001).

Οι μεταβλητές που επηρεάζουν την ικανότητα διήθησης, μπορεί να επηρεαστούν από τη φωτιά, συνήθως με αποτέλεσμα τη μείωση της διηθητικής ικανότητας και αύξηση της απορροής και σε ορισμένες λεκάνες απορροής και της παροχής. Οι μεταβλητές αυτές περιλαμβάνουν:

- Τον τύπο της φυτοκάλυψης.
- Το ποσοστό του επιφανειακού εδάφους που καλύπτεται από τα φύλλα και αποσυντεθημένες οργανικές ύλες.
- Το βάθος που εκτείνονται τα συσσωματώματα οργανικής ύλης.

- Το πορώδες, η πυκνότητα του εδάφους κ.α. (DeBano, et al., 1998).

Ακόμη, η εκδήλωση μιας δασικής πυρκαγιάς έχει δυσμενείς συνέπειες στην αποθήκευση νερού στο έδαφος. Αυτό γίνεται, διότι η φυτοκάλυψη έχει καταστραφεί ολοσχερώς ή μερικώς από τη φωτιά και παράλληλα έχουν μειωθεί οι απώλειες της εξατμισοδιαπνοής, με αποτέλεσμα να παραμένει περισσότερο νερό στο έδαφος και να εμφανίζεται μεγαλύτερη απορροή και παροχή στη συγκεκριμένη λεκάνη.

Αρκετοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι οι πυρκαγιές δεν ασκούν ουδεμία επίδραση στις βροχοπτώσεις μιας περιοχής. Ωστόσο, οι πυρκαγιές των ορεινών δασών επηρεάζουν σημαντικά τις συνολικές κατακρημνίσεις, διακόπτοντας ουσιαστικά, με την καταστροφή της βλάστησης, το φαινόμενο της ομιχλοβροχής. Η απώλεια της ομιχλοβροχής έχει άμεσες επιπτώσεις στο υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής. Το φαινόμενο δύναται να εμφανιστεί, με πολύ μικρότερη ένταση, στα κλαδιά των καμένων ιστάμενων κορμών και γι αυτό πολλοί υδρολόγοι είναι αντίθετοι με την απομάκρυνσή τους.

Η επίδραση της πυρκαγιάς στην απορροή, εκτιμάται διαχωρίζοντας την άμεση από τη βασική απορροή, καθώς σχετίζεται με αλλαγές στην παροχή, στην αιχμή και στην χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής του υδρογραφήματος (DeBano et al., 1998).

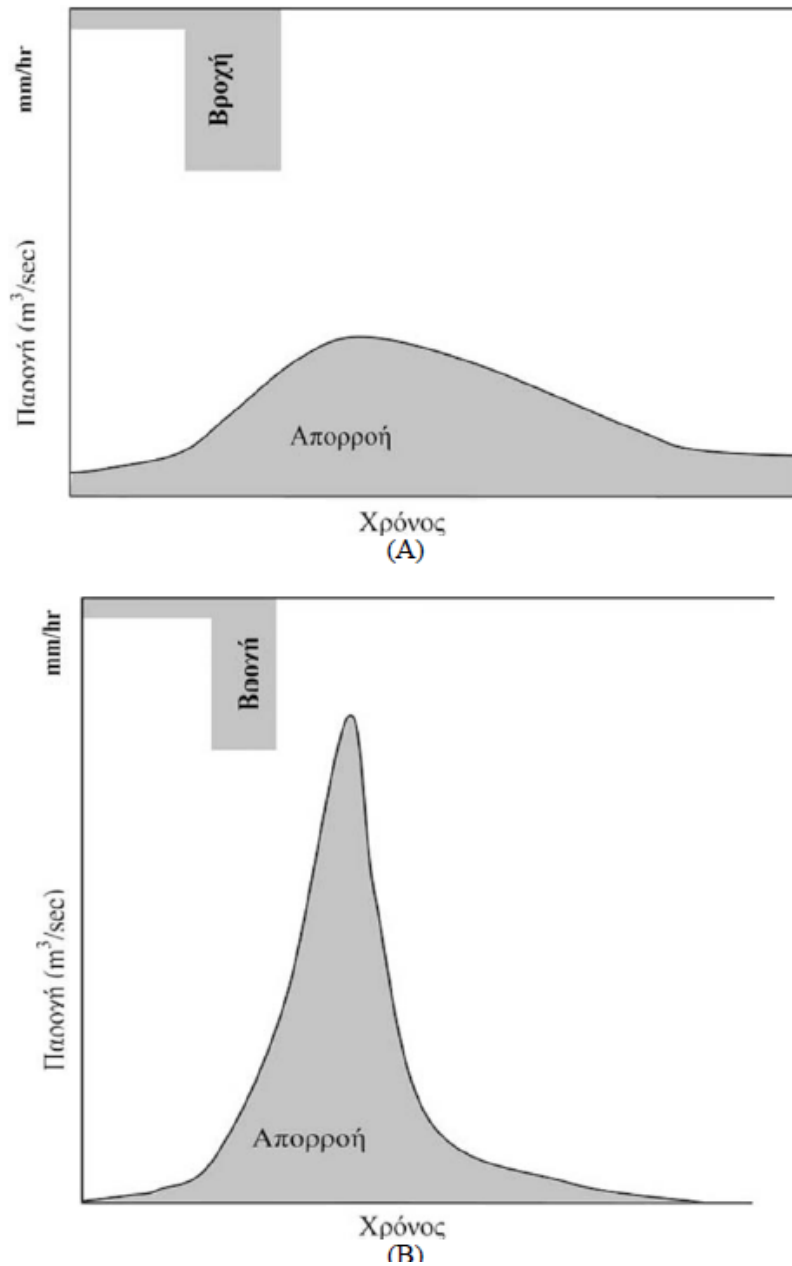
Στο Σχήμα 1(A) και (B), παρουσιάζεται η αλλαγή των χαρακτηριστικών ενός υδρογραφήματος μιας λεκάνης απορροής μετά από πυρκαγιά.

Μετά την πυρκαγιά εκτός των άλλων μεταβάλλονται τόσο το ύψος και η ενέργεια της βροχής όσο και πολλές από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Οι διαχρονικές μεταβολές των χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής μετά από πυρκαγιά (Μπαλούτσος, et al., 2001), οι διεργασίες διάβρωσης του εδάφους και δημιουργίας πλημμύρας φαίνονται στο Σχήμα 2.

Σύμφωνα με μελέτες, στο μεσογειακό οικοσύστημα παρατηρήθηκε αύξηση της επιφανειακής απορροής και της διάβρωσης κατά τουλάχιστον μία με δύο τάξεις μεγέθους σε σχέση με τις μη καμένες εκτάσεις (Inbar, et al., 1998), (Rulli, et al., 2005), (Rulli, 2006) . Αναλυτικότερα, έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της επιφανειακής απορροής κυμαίνεται από 11% (Anderson, et al., 1976) μέχρι 300% (Nasser, 1988) σε μεγάλες λεκάνες απορροής, μέχρι 800% σε μικρές (Campbell, 1977) και μέχρι 50.000% σε πειραματικές επιφάνειες (Inbar, 1998). Έκτος από την αύξηση της απορροής αναμένεται αύξηση στις πλημμυρικές αιχμές, οι οποίες κυμαίνονται από 45% (Anderson, et al., 1976) μέχρι 800% (Nasser, 1988) σε μεγάλες λεκάνες, ενώ σε μικρές η αύξηση φτάνει 5700% (Campbell, 1977).

Μια πρόσφατη έρευνα έδειξε αύξηση 1800% έως 5700% της πλημμυρικής απορροής και από 1900% έως 3600% της παροχής αιχμής για το ίδιο ύψος βροχόπτωσης που σημειώθηκε πριν και 6 μήνες μετά από την πυρκαγιά του 2003 σε πειραματικές

επιφάνειες σε λεκάνες απορροής στην Ιταλία (Rulli, et al., 2005). Σε μεταγενέστερη μελέτη κατέληξαν ότι αυξάνεται σημαντικά ο πλημμυρικός κίνδυνος δεδομένου ότι σε ένα έντονο γεγονός βροχόπτωσης θα σχηματισθεί πλημμυρική παροχή αισθητά μεγαλύτερη από αυτή που θα εμφανιζόταν σε συνθήκες προ πυρκαγιάς.



Σχήμα 1: Υδρογράφημα πριν (A) και μετά την πυρκαγιά (B), (Μπαλούτσος, et al., 2001)

Δημιουργία υδρόφοβου στρώματος εντός του εδάφους μετά την πυρκαγιά από καύση οργανικής ουσίας και διείσδυση χημικών ενώσεων εντός αυτού. Συντελεί στην αύξηση της επιφανειακής απορροής και σε πλάγια κίνηση της υπεδάφιας απορροής	1	Πτώση μεγαλύτερου ύψους βροχής στην επιφάνεια της λεκάνης λόγω έλλειψης βλάστησης-υδατοσυγκράτησης.	2
Συγκράτηση λιγότερης υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της καύσης των επιφανειακών φυτικών υπολειμμάτων (φυλλάδας, χούμου, κ.λπ.)	3	Κατακερματισμός των εδαφικών συσσωμάτων λόγω μεγαλύτερης ενέργειας των σταγόνων της βροχής.	4
Μείωση της ταχύτητας διήθησης της βροχής στο έδαφος λόγω απόφραξης των πόρων του.	5	Δημιουργία επιφανειακής απορροής στις πλαγιές της λεκάνης.	6
Μείωση της αντίστασης του εδάφους στην παράσυρση από την επιφανειακή απορροή, λόγω έλλειψης βλάστησης.	7	Διάβρωση και παράσυρση του εδάφους από τις πλαγιές της λεκάνης προς τα κατάντη και τις κοίτες των υδατορευμάτων.	8
Σημαντική και απότομη αύξηση της υδατοστερεοπαροχής στην κοίτη των υδατορευμάτων.	9	Διάβρωση του πυθμένα και των πρανών της κοίτης των υδατορευμάτων και μεταφορά των υλικών προς τα κατάντη.	10
Υπερχείλιση της πεδινής κοίτης του υδατορεύματος και επιδείνωση της κατάστασης σε περίπτωση ύπαρξης ανθρώπινων παρεμβάσεων.	11	Δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων στην πεδινή γεωργική και κατοικημένη περιοχή της λεκάνης με πληθώρα δυσμενών επιπτώσεων.	12

Σχήμα 2: Διαχρονικές μεταβολές χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής μετά από πυρκαγιά (Μπαλούτσος, et al., 2001)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

---

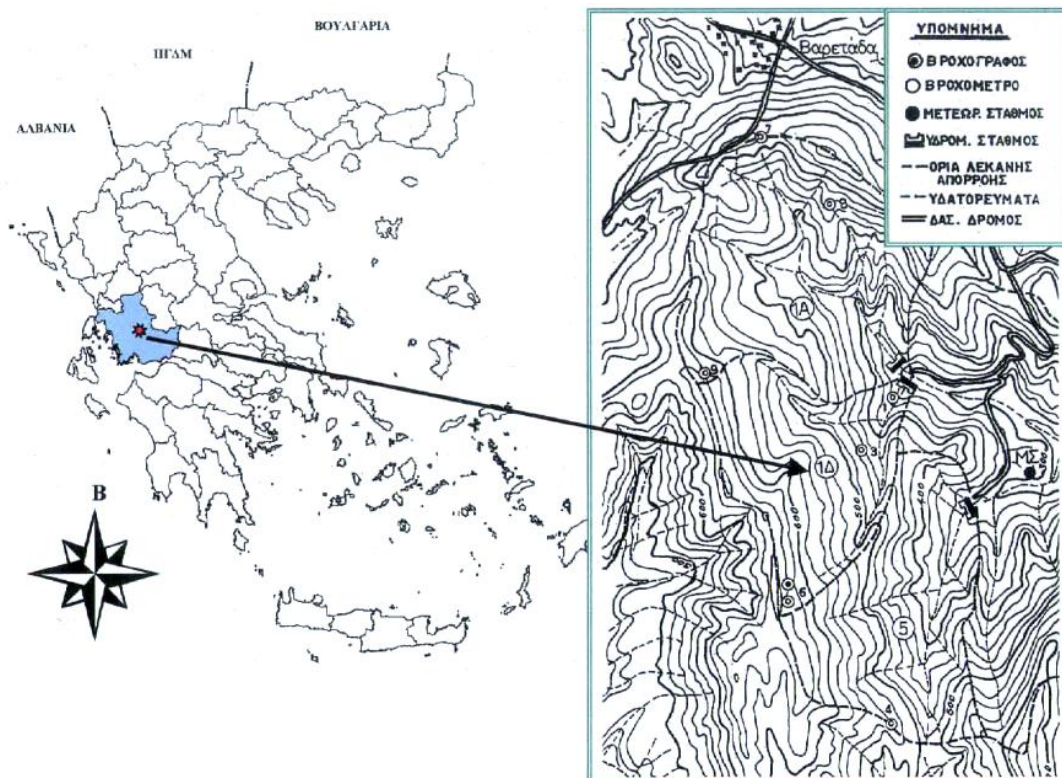
### **2.** Περιοχή μελέτης-Ανάλυση δεδομένων

#### **2.1** Περιγραφή λεκάνης απορροής Βαρετάδας

#### **2.2** Γεωμορφολογική προσομοίωση

## 2. Περιοχή μελέτης-Ανάλυση δεδομένων

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης της πειραματικής λεκάνης απορροής με κωδικό αριθμό 1Δ, του ρέματος Πουρνόσκαλα του ποταμού Αχελώου. Βρίσκεται στην περιοχή Βαρετάδα του Νομού Αιτωλοακαρνανίας, 24 χιλιόμετρα ανατολικά της Αμφιλοχίας (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Περιοχή μελέτης, πειραματική λεκάνη απορροής 1Δ.

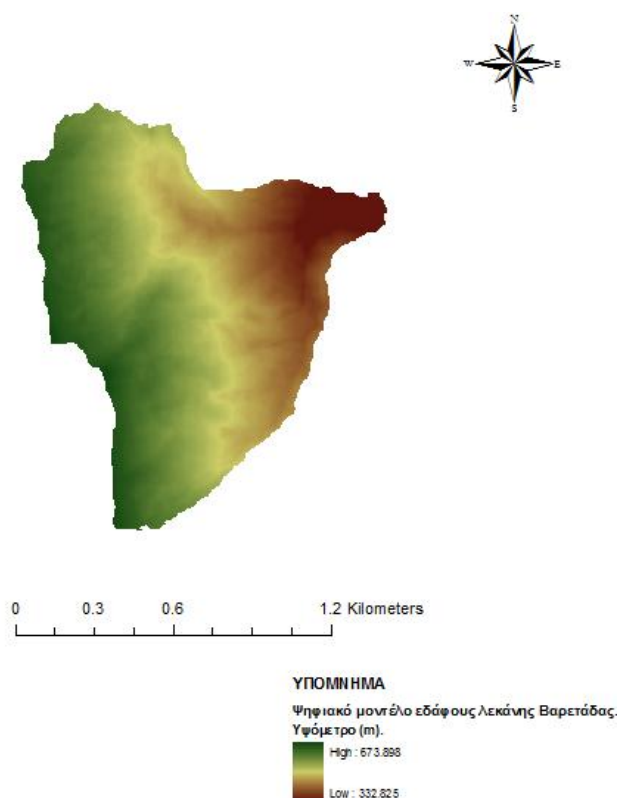
Το Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ & ΤΔΠ) του πρώην Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ), το 1995 επέλεξε να μελετήσει και να διαπιστώσει τυχόν μεταβολές που μπορεί να υπάρξουν στην υδρολογική δίαιτα, την ποσότητα και τη ποιότητα της απορροής, σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα αείφυλλων πλατύφυλλων (μακί). Στην παρούσα εργασία, επιλέχθηκε η συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, πρωτίστως λόγω του ορεινού της χαρακτήρα και δευτερευόντως γιατί βασικός σκοπός ήταν να μελετηθεί η υδρολογική συμπεριφορά μιας μικρής σε μέγεθος λεκάνης. Ακόμη, διότι είναι σημαντική η συνεισφορά αυτής της μικρής δασικής λεκάνης απορροής στους ταμειυτήρες της γύρω περιοχής (Στράτου, Καστρακίου και Κρεμαστών).

Οι υδατικοί πόροι της Δυτικής Ελλάδας, λόγω του μεγάλου ύψους των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που παρουσιάζουν, καλύπτουν ένα σημαντικό

μέρος της ζήτησής τους για την υπόλοιπη Ελλάδα, κυρίως την Ανατολική καθώς και την περιοχή της Αθήνας. Επομένως, η μελέτη της απόκρισης μικρών λεκανών απορροής είναι σημαντική για την ανάπτυξη και διαχείριση των υδατικών, εδαφικών και βλαστητικών πόρων της περιοχής. Όπως προαναφέρθηκε, η λεκάνη καλύπτεται από αείφυλλα πλατύφυλλα, τα οποία προστατεύουν το έδαφος από τη διάβρωση και δίνουν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα για την αύξηση της απορροής, συγκριτικά με τα υψηλά δάση, παρόλο που καταναλώνουν μεγαλύτερες ποσότητες νερού. Έτσι με κατάλληλους δασοκομικούς χειρισμούς θα μπορούσαν να αποδώσουν μεγαλύτερη απορροή.

## 2.1 Περιγραφή λεκάνης απορροής Βαρετάδας.

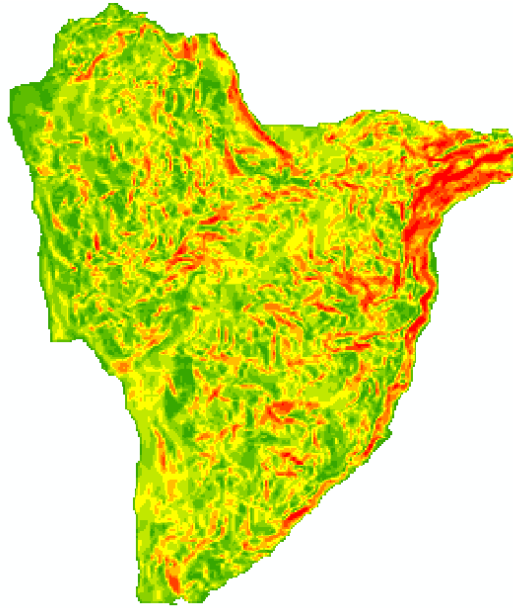
Η λεκάνη απορροής του ρέματος Πουρνόσκαλα οριοθετείται 2,5 χιλιόμετρα νότια του χωριού Βαρετάδα. Έχει συνολική έκταση 1,235 km<sup>2</sup> και περίμετρο ίση με 5.840m. (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους λεκάνης απορροής Βαρετάδας.

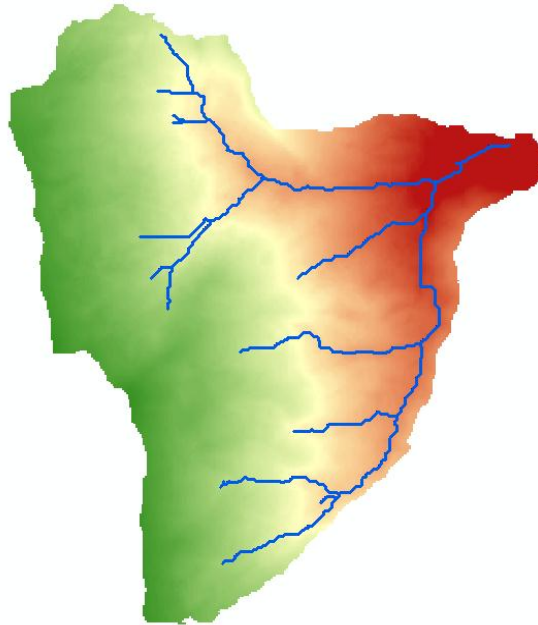
Χαρακτηρίζεται ως μικρή ορεινή δασωμένη λεκάνη απορροής Α' τάξης με έντονες κλίσεις, καθώς η μέγιστη κλίση που εμφανίζει είναι ίση με 33,67%, ενώ η μέση

ισούνται με 13,53% (Σχήμα 4). Επικρατούν εκθέσεις Α και ΒΑ. Το μέγιστο υψόμετρο της λεκάνης είναι ίσο με 632.98m, το ελάχιστο 366.3m, ενώ το μέσο είναι 529.6 m.



Σχήμα 4: Χάρτης κλίσεων γης της περιοχής μελέτης.

Τέλος, το μήκος του κυρίου υδατορεύματος της είναι 1.451,82 m, έχει πυκνότητα υδρογραφικού δικτύου 0,28 km/km<sup>2</sup> (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Χάρτης υδρογραφικού δικτύου της πειραματικής λεκάνης.



### 2.1.1. Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Στην περιοχή το έδαφος χαρακτηρίζεται ως Hargic Luvisol (FAO, 1988) και το μητρικό πέτρωμα που επικρατεί είναι ο φλύσχος, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των κλαστικών ιζηματογενών πετρωμάτων και δεν αποτελεί ένα ομοιογενές πέτρωμα, αλλά γεωλογικό σχηματισμό. Αποτελείται από επάλληλες στρώσεις μάργας και πηλόλιθων εναλλασσόμενες με κροκαλοπαγή και ψαμμίτες (Εικόνες 4 και 5).

Τα εδάφη που προέρχονται από την τοπική και κυρίως φυσική, αποσάθρωση του φλύσχη, είναι πηλώδη (ψαμμιτικός φλύσχος) έως αργιλώδη (αργιλικός φλύσχος), όξινης αντίδρασης ( $pH < 7$ ), με βάθος 30-50 cm και είναι μικρής διαπερατότητας.



Εικόνα 4: Στρώσεις ψαμμιτικού και αργιλικού φλύσχη σε απόσταση 50 m από το μετεωρολογικό σταθμό (Μπουρλέτσικας, 2004)



Εικόνα 5: Στρώσεις ψαμμιτικού και αργιλικού φλύσχη στα πρηνή του κύριου υδατορεύματος 50 m πάνω από τη θέση του υδρομετρικού σταθμού. (Μπουρλέτσικας, 2004)

Ωστόσο, κατά θέσεις εντός της λεκάνης παρατηρούνται οι λεγόμενες «μελίστρες», εκεί η βλάστηση έχει καταστραφεί και υπάρχουν διάσπαρτες κηλίδες γυμνού μητρικού πετρώματος, το οποίο συνεχώς απολεπίζεται. Οι επιφάνειες αυτές, έχουν

άμεση σχέση με την υδρολογική απόκριση της λεκάνης καθώς παρουσιάζουν προβλήματα υποβάθμισης με έντονα φαινόμενα χαραδρωτικών διαβρώσεων (Εικόνα 6), επικοινωνούν με την κοίτη του πλησιέστερου υδατορεύματος και έτσι συντελούν στην πύκνωση του υδρογραφικού δικτύου.



Εικόνα 6: «Μελίστρες» και χαραδρωτικές διαβρώσεις στην περιοχή μελέτης (Μπουρλέτσικας,2004).

### 2.1.2. Κάλυψη και χρήσεις γης.

Η βλάστηση της λεκάνης είναι αντιπροσωπευτική των εδαφών από φλύσχη της περιφέρειας της Δ. Ελλάδας. Στο σύνολό της καλύπτεται από δασώδη βλάστηση-αείφυλλα πλατύφυλλα (*maquis*) ύψους 3 – 10 m, πυκνής συγκόμωσης (1,2 – 1,3) περίπου 60 ετών με κυρίαρχα είδη την κουμαριά (*Arbutus unedo*), το Φυλλίκι (*Phillyrea latifolia*), την αριά (*Quercus ilex*), το ρείκι (*Erica arborea*) το φράξος (*Fraxinus ornus*) κ.α. (Πίνακας 5).

Πίνακας 5: Κύρια χαρακτηριστικά βλάστησης πειραματικής λεκάνης απορροής Βαρετάδας (ΙΜΔΟ&ΤΔΠ).

Α/Α	Είδος δένδρου ή θάμνου	Αριθμός κορμών/ha	Ποσοστό κορμών	Κυκλική επιφάνεια/ha	
				m <sup>2</sup>	%
1	Φιλίκι ( <i>Phillyrea latifolia</i> )	3.803	47,4	10,3	24,9
2	Κουμαριά ( <i>Arbutus unedo</i> )	3.447	43,0	21,6	52,2
3	Αριά ( <i>Quercus ilex</i> )	343	4,3	8,3	20,0
4	Ερείκη δενδρώδης ( <i>Erica arborea</i> )	367	4,6	0,6	1,5
5	Άλλα είδη (Other species)	60	0,7	0,6	1,4
	<b>Σύνολο</b>	8.020	100,0	41,4	100,0

Η ανάπτυξη των δέντρων του σταθμού ήταν φυσική μετά από τη συστηματική ξύλευση που έγινε το 1950. Ο ανώροφος αποτελείται κυρίως από αριές ενώ στον υπόροφο κυριαρχούν θάμνοι είτε μεμονωμένοι είτε σε ομάδες. Επίσης, υπάρχουν

διάσπαρτα άτομα μεγάλης ηλικίας πλατύφυλλου δρυός (*Quercus conferta*) που καλύπτουν περίπου στο σύνολο τη μισή έκταση της λεκάνης. Όσον αφορά τις χρήσεις γης στην περιοχή, θα πρέπει να τονιστεί ότι γενικότερα, τα φυσικά οικοσυστήματα των αείφυλλων πλατύφυλλων, για πάρα πολλά χρόνια, αποτελούσαν (και αποτελούν και σήμερα αλλά σε μικρότερη κλίμακα), μια σημαντική πηγή εσόδων για τον παραδασόβιο πληθυσμό της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας. Ανάλογη με τα είδη που συγκροτούν τα πυκνά δάση των αείφυλλων πλατύφυλλων είναι και η αξιοποίησή τους από τους κατοίκους της ευρύτερης περιοχής. Έτσι λοιπόν, το ξύλο χρησιμοποιούνταν κυρίως για θέρμανση και για την παραγωγή ξυλανθράκων. Τα κλαδιά και τα υπολείμματα των υλοτομιών αφήνονταν μέσα στις συστάδες με σκοπό να υπάρχει ικανοποιητικός όγκος βιομάζας που θα συντελέσει στην αναγέννησή τους. Αυτό επιτεύχθηκε με τη θέσπιση απαγορευτικών διατάξεων για τη βοσκή οι οποίες αίρονταν μετά την παρέλευση 5-10 ετών αναλόγως των πιέσεων που ασκούσαν οι κτηνοτρόφοι της κάθε περιοχής.

Επίσης μια ακόμη σημαντική πηγή εσόδων του παραδασόβιου πληθυσμού των δασών της Δυτικής Στερεάς Ελλάδας ήταν και είναι η μελισσοκομία, ενώ μικρότερα έσοδα είχαν από την πώληση κάποιων άλλων θαμνωδών ειδών για χρήση τους στη βυρσοδεψία, στην αρωματοποιία και στη φαρμακευτική.

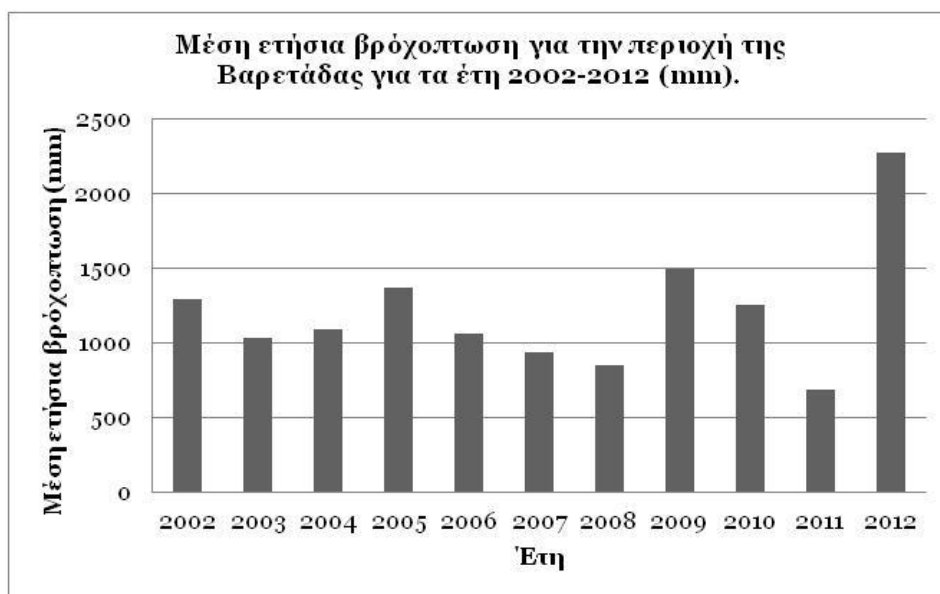
Στα πλαίσια λοιπόν της ανάπτυξης μιας δασοπονίας πολλαπλών σκοπών, όπου εκτός από τη διαχείριση των συγκεκριμένων δασικών οικοσυστημάτων για τους παραπάνω σκοπούς επιδιώκεται και η εξυπηρέτηση των υδρολογικών σκοπών (π.χ. αύξηση της απορροής), αλλά και γενικά η μελέτη των αλληλεπιδράσεων του κλίματος, της βλάστησης και του εδάφους, εγκαταστάθηκαν από τη Δασική Υπηρεσία (Ίδρυμα Δασικών Ερευνών Αθηνών) πειραματικές λεκάνες απορροής, οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν σαν ένα υδρολογικό εργαστήριο υπαίθρου.

### **2.1.3. Κλίμα**

Το κλίμα της περιοχής ποικίλλει καθώς οι βροχές και οι θερμοκρασίες και κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες παρουσιάζουν πολλές ιδιαιτερότητες. Η χωρική και χρονική κατανομή των κατακρημνισμάτων και η γνώση της μορφής, του ύψους, της διάρκειας και της έντασής των είναι πολύ σημαντική για την δασοκομική και υδρολογική διαχείριση των ορεινών λεκανών απορροής. Η μορφή των κατακρημνισμάτων της περιοχής είναι σχεδόν εξ ολοκλήρου βροχής και τα επεισόδια χιονιού που καταγράφηκαν στη διάρκεια των 30 περίπου ετών, είναι ελάχιστα. Παρακάτω παρατίθενται πίνακες με μετρήσεις δεκαετίας για ορισμένα από τα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Πίνακας 6: Μηνιαία βροχόπτωση για την περιοχή της Πουρνόσκαλας .

Μηνιαία βροχόπτωση για την περιοχή της Πουρνόσκαλας για τα έτη 2002-2012 σε mm													
ΈΤΗ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Σύνολο
2002	54	26	62	148	63	1.7	85	26.4	223	228.5	122.3	258.6	1298.5
2003	196.5	157.5	14	37.5	43	73	0	32.5	43	242.5	54	145.5	1039
2004	174	35.5	84.5	82.5	53	18	42	0	143	65.5	131.5	268	1097.5
2005	156.5	229	103	81	62	27	2	3	153	78	130	348.4	1372.9
2006	127	186.3	116.4	79	4.2	46.8	28	32	187.5	56	133	68.5	1064.7
2007	43.7	102	112.3	39.2	95.2	43	0.6	1	36.4	104.5	248	114.8	940.7
2008	54	50	98.8	58.5	11	32.5	0	0	48	217	119	163.5	852.3
2009	280	142.5	232.5	135.5	20.5	59.5	0	9.5	55.5	176.5	208	182.5	1502.5
2010	144.9	213	73.5	17	49	58	37.5	0	105.5	277	182	104	1261.4
2011	62.5	43	71.5	42	57	62.5	7	0	39	94	0	208	686.5
2012	229.8	438.6	92.7	325.5	322.8	0	0	72	2	0	173.4	621.3	2278.1

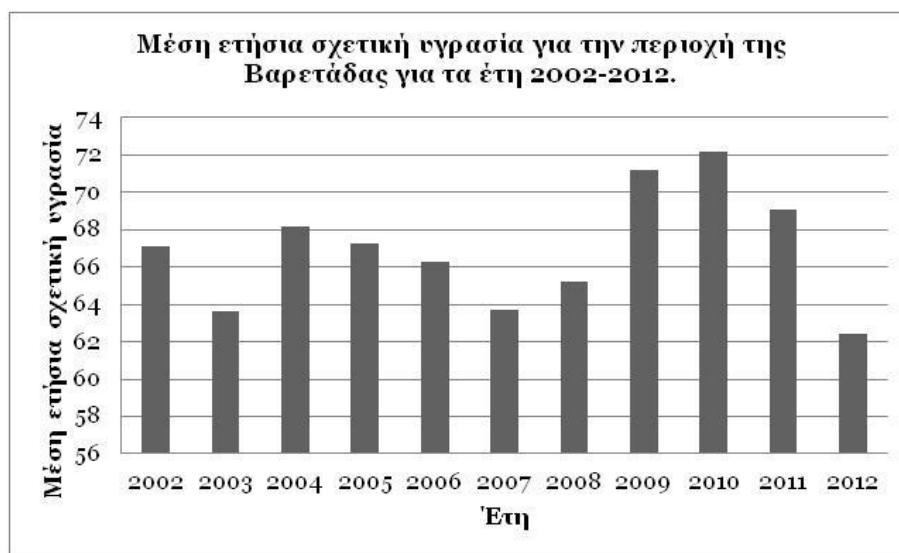


Διάγραμμα 1: Μέση ετήσια βροχόπτωση για τα έτη 2002-2012 (mm).

Από τον Πίνακα 6 και το Διάγραμμα 1 διαπιστώνεται ανισοκατανομή των βροχοπτώσεων μεταξύ των υδρολογικών ετών. Από το 2002 έως το 2005 κυμαινόταν στα ίδια περίπου επίπεδα, με μικρές διαφορές. Τη διετία 2006-2008 εμφανίζεται σαφής μείωση των βροχοπτώσεων στην περιοχή, ενώ το 2011 σημειώνεται η χαμηλότερη τιμή της δεκαετίας αφού η συνολική ετήσια βροχόπτωση είναι ίση 685 mm. Αντίθετα, το 2012 είναι το πιο υγρό έτος της δεκαετίας με ετήσιο ύψος βροχής 2278mm. Σχεδόν 3 φορές μεγαλύτερο του προηγούμενου υδρολογικού έτους.

Πίνακας 7: Μέσος όρος μηνιαίας σχετικής υγρασίας στην περιοχή της Πουρνόσκαλας

Μέσος όρος μηνιαίας σχετικής υγρασίας στην περιοχή της Πουρνόσκαλας για τα έτη 2002-2012													
ΈΤΗ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Μ.Ο.
2002	67.6	71	56.4	68.8	63.2	56.3	58.4	60.1	71.1	73.9	76.3	81.8	67.1
2003	79.7	65.7	62.8	65	58.5	54.2	54.2	52.8	59	69.9	72.8	69	63.6
2004	79.4	72.6	70.3	67.4	67.9	67.2	51.5	59.2	59.6	71.8	72.3	79.3	68.2
2005	72.9	75.9	74.6	64.3	66	62.1	56.3	54.9	63.1	66.6	74.5	77	67.3
2006	69.7	74.6	78.4	70.3	63.7	60.2	51	58.6	59.7	69.1	69.6	71.3	66.3
2007	73.8	71.7	66.4	64.1	67.1	58.4	37.5	52.5	56	62.7	79.2	75	63.7
2008	63.9	64.8	71	71.6	64.2	56.5	50.7	42.1	66.2	72.9	81.6	77.6	65.2
2009	86.9	78.1	77.1	66.2	61.7	62.7	54.1	53.1	63	78.4	84.3	89.5	71.2
2010	80.2	85.5	74.3	62.4	66.1	66.5	57.7	50.1	69.5	84.5	85.2	85	72.2
2011	85.8	69.4	75.4	69.6	71.4	69	60	49.8	56.3	68.2	66.5	88.4	69.1
2012	76	81.7	73.3	79.1	76.6	52.6	49.9	51.5	36.8	0	80.9	90.3	62.4

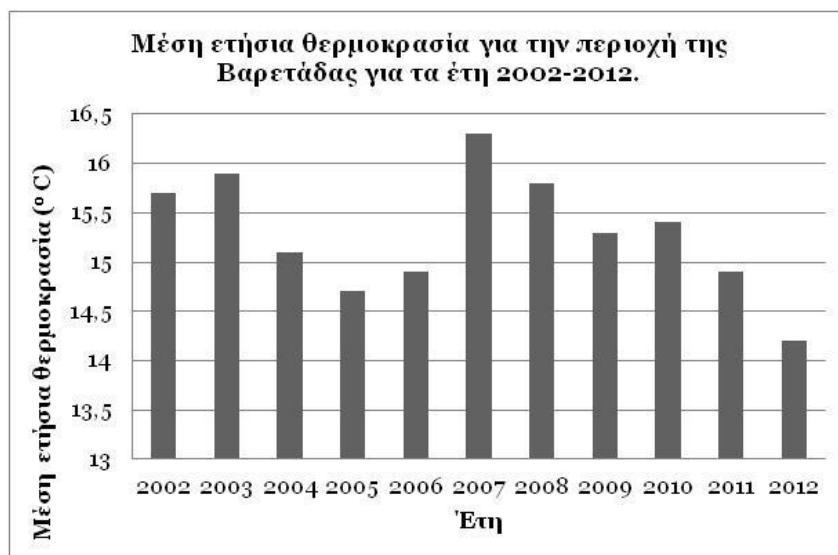


Διάγραμμα 2: Μέση ετήσια σχετική υγρασία για τα έτη 2002-2012 .

Παρατηρείται από τον Πίνακα 7 και το Διάγραμμα 2, ότι η σχετική υγρασία κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της δεκαετίας σε ίδια επίπεδα με εξαίρεση την διετία 2009-2011 όπου υπάρχει μια μικρή αύξηση.

Πίνακας 8: Μέσος όρος μηνιαίων θερμοκρασιών στην περιοχή της Πουρνόσκαλας

Μέσος όρος μηνιαίων θερμοκρασιών στην περιοχή της Πουρνόσκαλας για τα έτη 2002-2012													
ΈΤΗ	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαΐ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Μ.Ο.
2002	5.7	10.7	12.1	13.4	18.7	23.5	24.3	23.2	19.2	16.2	13	7.9	15.7
2003	8.9	3.9	8.5	12.6	21.5	24.7	24.8	26.4	20.2	17.3	13.4	8.5	15.9
2004	5.4	7.2	10.1	13.4	15.8	21.2	24.6	24	21.1	17.8	11.3	8.9	15.1
2005	6.5	4.8	9.5	12	18	21.2	24.6	24.4	21.5	15.7	10.4	7.7	14.7
2006	5.1	6.7	9.2	13.9	17.8	21.2	24.2	24.5	20.9	16.8	10.4	8.4	14.9
2007	8.7	8.7	11.4	14.6	19.3	23.5	27.6	26.7	20.2	17	11.2	7.3	16.3
2008	8.8	7.3	11.4	13.2	17.8	23	25	26.8	19.9	15.8	12.4	7.6	15.8
2009	7.9	5.6	8.2	13.7	18.9	21.5	25.1	24.8	21	15.6	11.3	9.9	15.3
2010	7.2	7.8	9.7	14.2	17.4	20.9	24.5	26.3	20.1	14.6	13.7	8.7	15.4
2011	7.2	7.9	9.2	12.6	16.6	21.3	24.4	25.5	23	14.1	9.5	7.6	14.9
2012	3.5	4.9	10.1	13.3	16.8	24	27.2	25.9	25.1	0	12.3	6.7	14.2



Διάγραμμα 3: Μέση ετήσια Θερμοκρασία για τα έτη 2002-2012 (°C).

Τέλος, η μέση ετήσια θερμοκρασία στην περιοχή δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα μεγάλες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια των ετών. Αξίζει να αναφερθεί ότι το 2007 είναι το έτος με την υψηλότερη.

#### 2.1.4. Εξοπλισμός των μετρήσεων της περιοχής μελέτης

Το Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ&ΤΔΠ) του πρώην Εθνικού Ιδρύματος Αγροτικής Έρευνας (ΕΘΙΑΓΕ), έχει εγκαταστήσει στην περιοχή μελέτης έναν μετεωρολογικό σταθμό

(ΜΣ) που βρίσκεται κοντά στην πειραματική λεκάνη απορροής 1Δ, σε σημείο με συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ 87, X: 266221,77 και Y: 4302701,63, υψόμετρο 360 m και απόσταση από την έξοδό της 750 m., στην ίδια θέση από το 2002 εγκαταστάθηκε και ένας αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός (Εικόνα 7).



Εικόνα 7: Μετεωρολογικός σταθμός της περιοχής μελέτης (Μπουρλέτσικας,2004).

Ο μετεωρολογικός σταθμός δίνει τιμές για :

- Το ύψος της βροχής μέχρι 300 mm και χρονική κατανομή της με τη βοήθεια χιονοβροχογράφου τύπου Belford,
- Την ηλιακή ακτινοβολία με τη βοήθεια ακτινογράφου τύπου SIAP BOLOGNA,
- Τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα με τη βοήθεια θερμοϋγρογράφου που βρίσκεται εντός μετεωρολογικού κλωβού.
- Τη δυναμική εξατμισοδιαπνοή με τη βοήθεια ενός εξατμισιμέτρου τύπου WILD.
- Την κατεύθυνση και ταχύτητα ανέμου στα 3,0 m από το έδαφος με τη βοήθεια ανεμογράφου ο οποίος μπορεί να μετρήσει στις 8 βασικές κατευθύνσεις.

Επιπρόσθετα, μέσα στον κλωβό υπάρχουν δύο συμβατικά υδραργυρικά θερμομέτρα, θερμό και υγρό, για τον προσδιορισμό της υγρασίας και τη βαθμονόμηση του υγρογράφου.

Ακόμη στην περιοχή υπάρχει για ερευνητικούς σκοπούς (δασοπονικούς - υδρολογικούς) μια πειραματική επιφάνεια εντός της οποίας πραγματοποιούνται μετρήσεις για τη διαπερώσα βροχή μέσω συλλεκτήρων που έχουν τοποθετηθεί με τυχαίο τρόπο, την κορμοαπορροή και τη θερμοκρασία εδάφους και αέρα. Η

διαπερώσα βροχή και η κορμοαπορροή είναι σημαντικές παράμετροι για τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής. Γι αυτό το λόγο μελετούνται από το ΙΜΔΟ&ΤΔΠ.

Δίπλα από την πειραματική επιφάνεια είναι τοποθετημένα τρία βροχόμετρα (Εικόνα 8), σε σημείο με συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ 87, X: 265445,69 και Y: 4302795,60 , με υψόμετρο 420 m.



Εικόνα 8: : Βροχόμετρα πλησίον της πειραματικής λεκάνης (Μπουρλέτσικας,2004).

Υπάρχει ένα κλασσικό δεκαπλασιαστικό βροχόμετρο και δύο μεταλλικά τύπου Lambrecht για τη μέτρηση του όγκου της βροχής, εκ των οποίων το ένα είναι τοποθετημένο σε 1.5m ύψος από το έδαφος και το άλλο στην επιφάνεια του εδάφους. Τέλος, στη βάση (έξοδο) της υπό μελέτη λεκάνης και σε σημείο με συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ 87, X: 265344,70 και Y: 4303047,00 και υψόμετρο 350 m, είναι εγκατεστημένος υδρομετρικός σταθμός εξοπλισμένος με σταθμηγράφο τύπου A. Ott, που λειτουργεί με ταινία μηνιαίας καταγραφής και ωριαίου βήματος 1 cm, μεγίστης μέτρησης ύψους στάθμης 1.250 mm (Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Υδρομετρικός σταθμός ορθογωνικής διατομής στην έξοδο της πειραματικής λεκάνης (Μπουρλέτσικας,2004).



## **2.2 Γεωμορφολογική προσομοίωση**

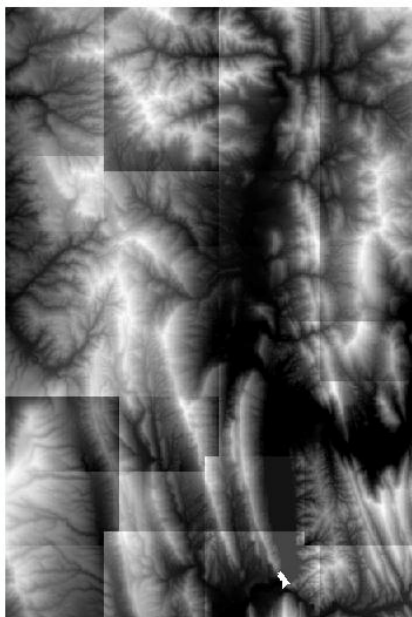
Για τις ανάγκες της εργασίας και συγκεκριμένα για την γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ArcGIS 9.3 και η εργαλειοθήκη γεωχωρικής υδρολογικής προσομοίωσης HEC – GeoHMS. Το HEC – GeoHMS αποτελεί επέκταση του ArcMap και της εργαλειοθήκης ArcHydro.

Έτσι, δόθηκε η δυνατότητα να προετοιμαστούν τα απαραίτητα δεδομένα που είναι χρήσιμα για τη διαδικασία της υδρολογικής προσομοίωσης της βροχής σε απορροή της πειραματικής λεκάνης και στη συνέχεια εισήχθησαν στο μοντέλο HEC-HMS. Πιο συγκεκριμένα, εξάγονται δύο αρχεία εισόδου για το HEC-HMS, το αρχείο του μοντέλου της λεκάνης (basin model), όπου φαίνονται τα γεωμορφολογικά και υδρολογικά στοιχεία της λεκάνης και το αρχείο χάρτη (background map) στο οποίο οπτικοποιούνται οι υπολεκάνες απορροής και τα υδατορεύματα της υπό μελέτη λεκάνης. Ως αρχείο εισόδου για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής σε μορφή raster.

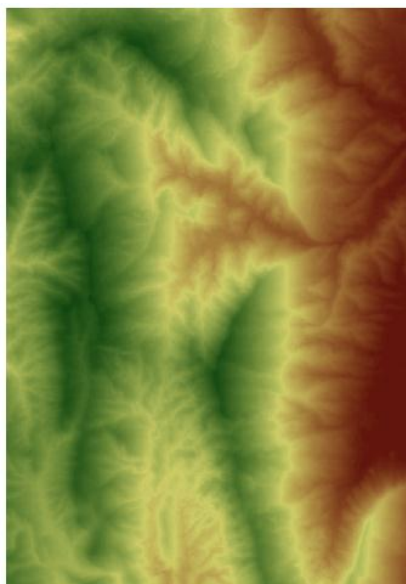
Η γεωμορφολογική ανάλυση ξεκίνησε σε περιβάλλον εργασίας ArcGIS 10, αλλά λόγω τεχνικών δυσλειτουργιών και αστάθειας λειτουργίας της εργαλειοθήκης HEC – GeoHMS, η εργασία ολοκληρώθηκε σε περιβάλλον λειτουργίας ArcGIS 9.3.

### **2.2.1. Εισαγωγή και επεξεργασία αρχικών γεωχωρικών δεδομένων**

Τα πρωτογενή γεωχωρικά δεδομένα και συγκεκριμένα το ψηφιακό μοντέλο εδάφους είναι της μορφής ESRI Lattice European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS 89) – σε ανάλυση καννάβου 5m παροχή από την Κτηματολόγιο Α.Ε. Η αρχική μορφή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους είναι σε μορφή μωσαϊκού όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, έπειτα από επεξεργασία που έγινε με εργαλεία του ArcGIS τα κομμάτια του μωσαϊκού που αφορούν την περιοχή μελέτης ενώθηκαν και δημιουργήθηκε το τελικό ψηφιακό μοντέλο εδάφους Σχήμα 7.



Σχήμα 6: Αρχική μορφή ψηφιακού μοντέλου σε μορφή μωσαϊκού.

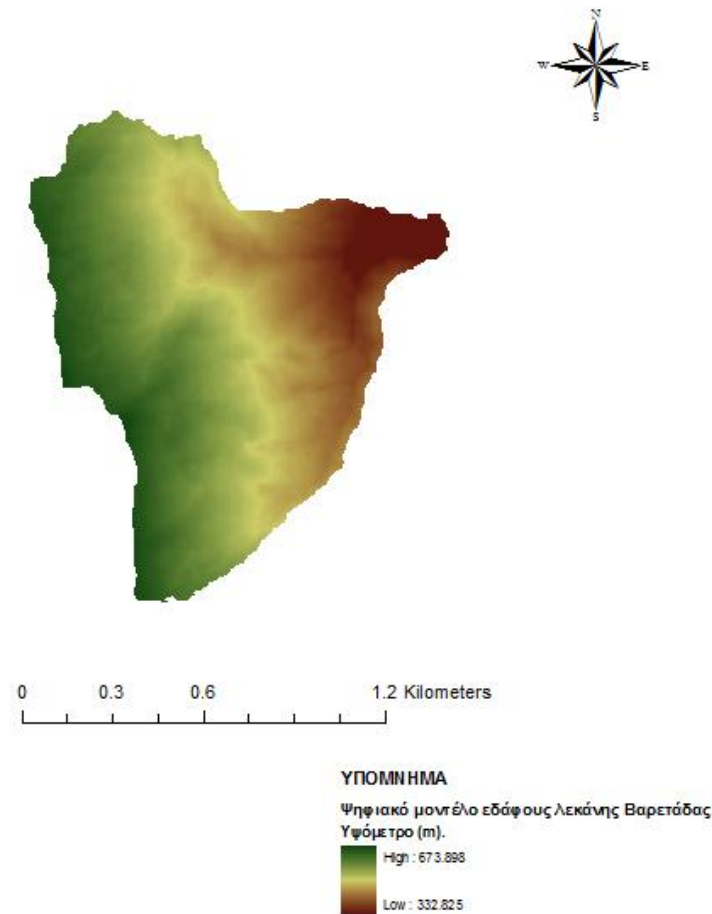


Σχήμα 7: Τελική μορφή ψηφιακού μοντέλου εδάφους ευρύτερης περιοχής.

Εν συνεχεία, έγινε ο καθορισμός των ορίων της πειραματικής λεκάνης απορροής της Βαρετάδας. Ο καθορισμός αυτός έγινε με βάση τις γεωγραφικές συντεταγμένες που μας δόθηκαν για την ευρύτερη περιοχή μέσα από το περιβάλλον εργασίας ArcGIS.

Ως εκ τούτου, με τη χρήση του εργαλείου editor του ArcGIS, δημιουργήθηκε ένα καινούριο αρχείο μορφής πολυγώνων (μάσκα) που καθόρισε τα όρια της λεκάνης απορροής. Έπειτα με τη χρήση του εργαλείου Clip (Arc Toolbox – Analysis Tools – Extract – Clip) έγινε η εξαγωγή των κοινών σημείων μεταξύ του αρχείου raster και

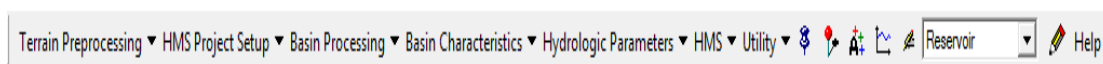
της μάσκας που δημιουργήθηκε, ούτως ώστε να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα ψηφιακού εδάφους της υπό μελέτη λεκάνης (Σχήμα 8).



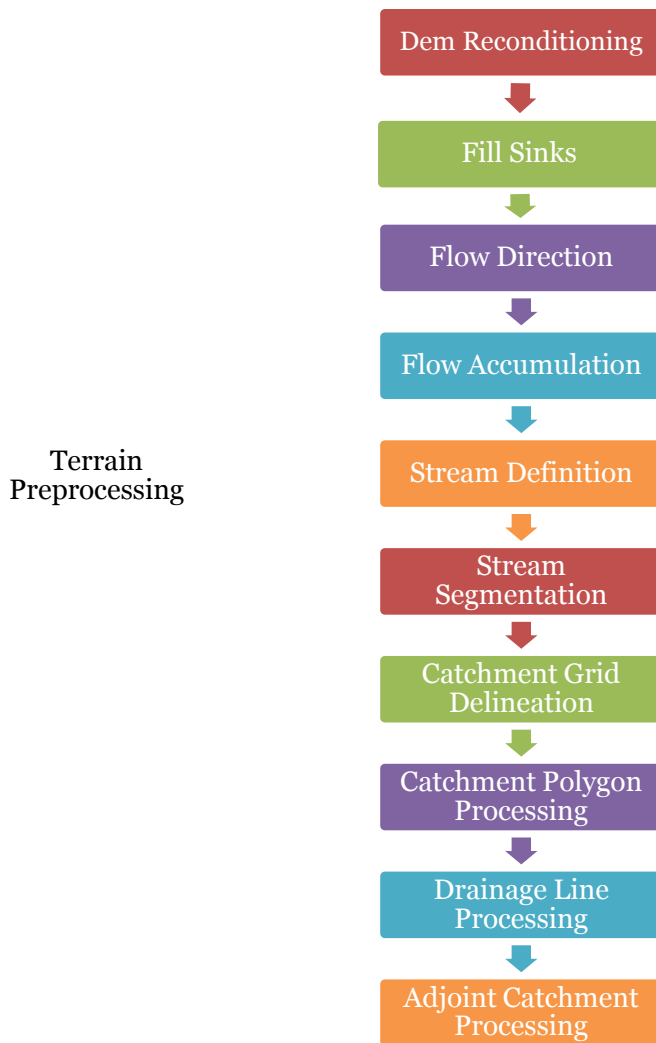
Σχήμα 8: Τελική μορφή ψηφιακού μοντέλου εδάφους έπειτα από επεξεργασία.

### 2.2.2. Προεπεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους

Αρχικά, γίνεται μια προεπεξεργασία (terrain preprocessing) των γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών του εδάφους, με τη χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους ως πρωτογενούς αρχείου. Με τη διαδικασία αυτή εξάγονται τα δεδομένα που απαιτούνται για την μετέπειτα υδρολογική επεξεργασία στο HEC – HMS . Στο Σχήμα 10 φαίνεται σε βήματα η διαδικασία που ακολουθείται στην εργαλειοθήκη HEC – GeoHMS (Σχήμα 9 ) στο στάδιο αυτό:



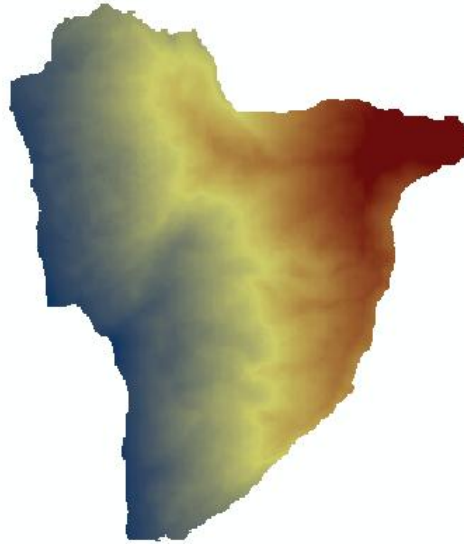
Σχήμα 9:Εργαλειοθήκη Geo-HMS.



Σχήμα 10: Βήματα για την προ επεξεργασία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους.

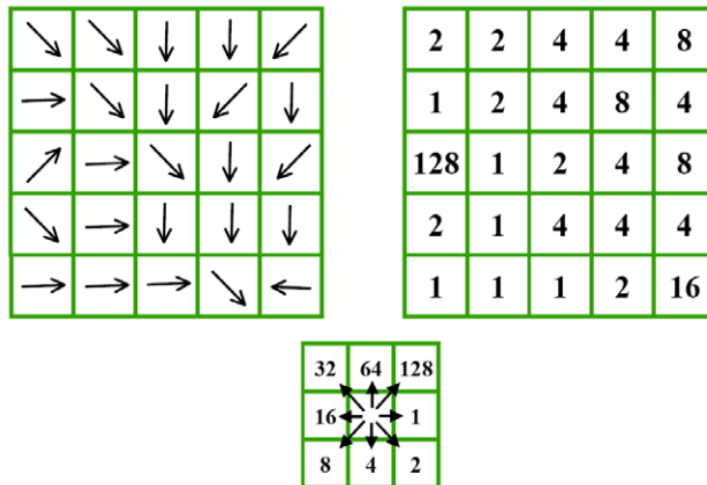
### 2.2.3. Επεξήγηση εντολών

- **DEM Reconditioning:** Η εντολή αυτή τροποποιεί τα κελιά του ψηφιακού μοντέλου εδάφους κατά μήκος των ρεμάτων, ώστε να διορθωθούν τυχόν λανθασμένα υψόμετρα που προκύπτουν κατά την υψομετρική αποτύπωση.
- **Fill Sinks:** Διορθώνει τα βυθίσματα, αυξάνοντας το υψόμετρο εκείνων των φατνίων που έχουν χαμηλότερο υψόμετρο από εκείνο που ορίζει ο χρήστης, ούτως ώστε να φτάσουν όλα στο ίδιο επίπεδο (Σχήμα 11).

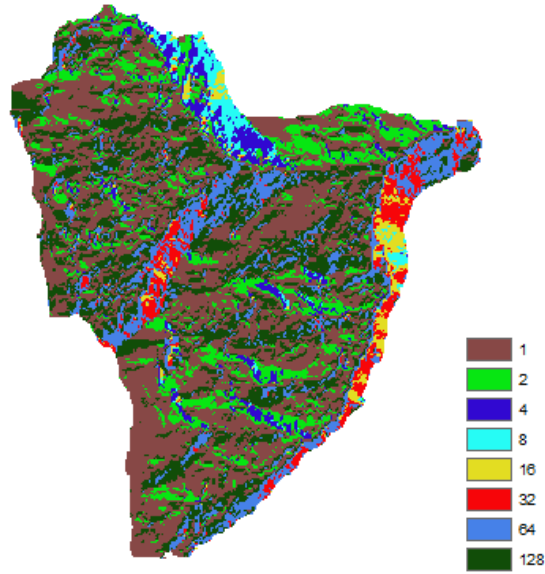


Σχήμα 11: Διόρθωση βυθισμάτων.

- **Flow Direction:** Με την εντολή αυτή υπολογίζεται η κατεύθυνση του νερού κάθε φατνίου χωριστά και δημιουργείται ο κানাβος διεύθυνσης ροής (Σχήμα 12). Υπάρχουν οκτώ κατευθύνσεις στις οποίες μπορεί να κινηθεί η ροή από ένα φατνίο προς τα γειτονικά του. Αυτές φαίνονται στο Σχήμα 13.

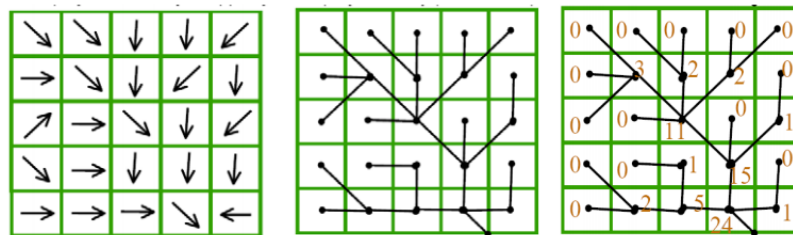


Σχήμα 12:Κάναβος Διεύθυνσης Ροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2009)

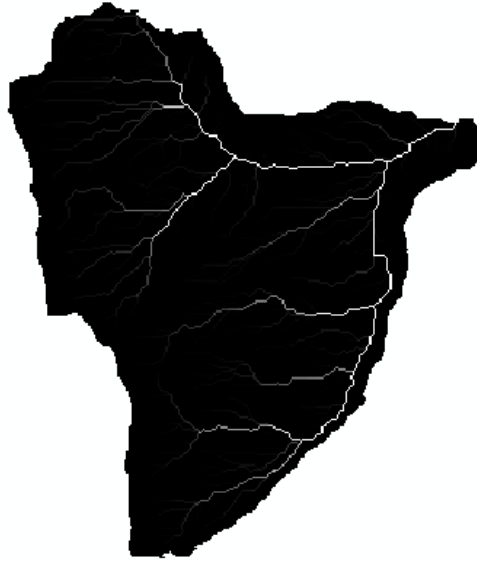


Σχήμα 13: Διεύθυνση ροής στην περιοχή μελέτης.

- Flow Accumulation:** Το εργαλείο αυτό δημιουργεί τον κানাβο συγκεντρωτικής ροής. Βασίζεται στον κানাβο διεύθυνσης απορροής (Σχήμα 14) και προσδιορίζει το μοναδικό μονοπάτι, για κάθε φατνίο που ακολουθεί η σταγόνα της βροχής έως ότου να φτάσει στην έξοδο της λεκάνης. Η συγκεντρωτική ροή για κάθε φατνίο του κανάβου ισούται με το άθροισμα των φατνίων που απορρέουν σ αυτό από τα γειτονικά φατνία (Σχήμα 15).

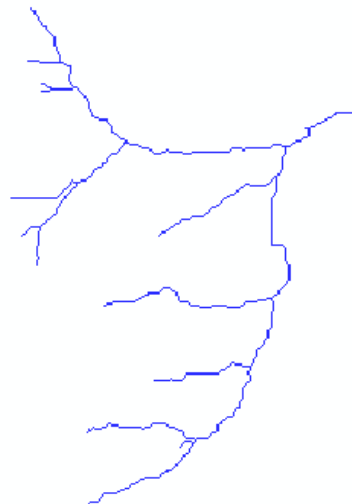


Σχήμα 14: Κανάβος συγκεντρωτικής ροής (Στάμου & Σκοπελίτη, 2009)

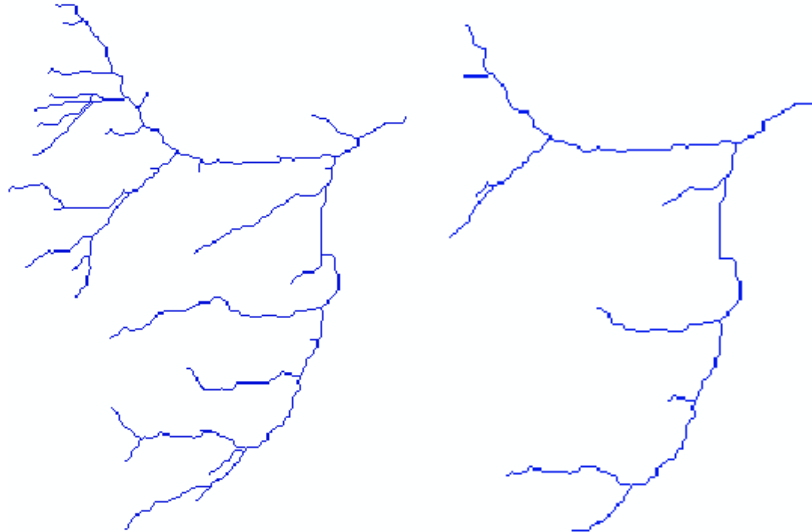


Σχήμα 15: Συγκεντρωτική ροή.

- **Stream Definition:** Σε αυτό το βήμα ταξινομούνται όλα τα φατνία με συγκέντρωση ροής μεγαλύτερη από το κατώφλι που έχει ορίσει ο χρήστης ως φατνία που ανήκουν σε ένα υδατόρευμα. Όσο μικρότερο το κατώφλι που θα επιλεγεί, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των υπολεκανών που θα οριοθετηθούν σε παρακάτω στάδιο της επεξεργασίας. Στην παρούσα εργασία έπειτα από διάφορες τιμές που εισήχθησαν, το κατώφλι που επιλέχθηκε είναι 1000 φατνία) (Σχήμα 16). Χαρακτηριστικά φαίνονται στις παρακάτω Εικόνες για διάφορες τιμές επιλογής κατωφλιού (Σχήματα 17 & 18).

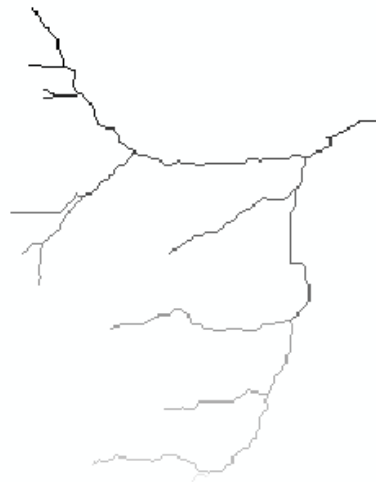


Σχήμα 16: Κατώφλι 1000 φατνία.



Σχήμα 17: Κατώφλι 500 φατνία (αριστερά) και 2000 φατνία (δεξιά).

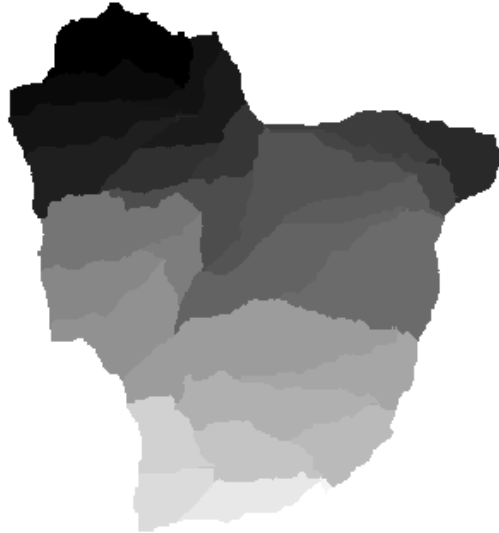
- **Stream Segmentation**: Εδώ διαχωρίζεται το δίκτυο υδατορεύματος σε μικρότερα κομμάτια. (Σχήμα 18).



Σχήμα 18: Διαχωρισμός υδατορεύματος.

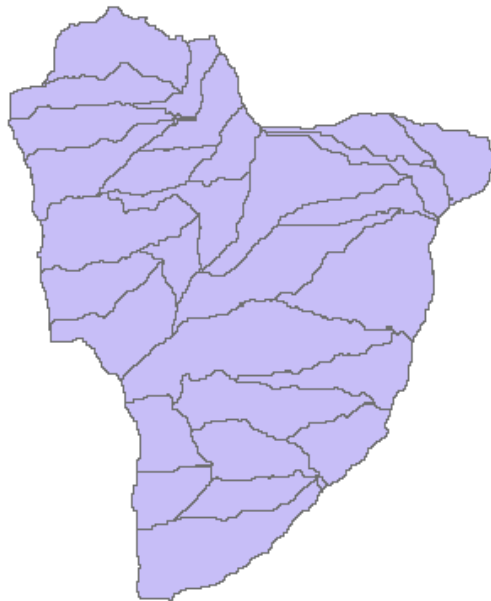
- **Catchment Grid Delineation**: Αυτό το βήμα οριοθετεί μια υπολεκάνη για κάθε τμήμα του υδατορεύματος (Σχήμα 19).





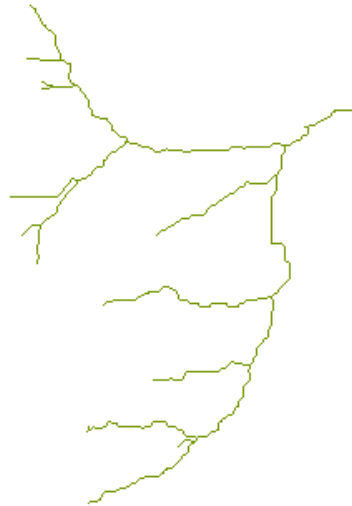
Σχήμα 19: Οριοθέτηση υπολεκανών για κάθε τμήμα υδατορεύματος σε μορφή πλέγματος.

- **Catchment Polygon Processing:** Με αυτή την εντολή μετατρέπει τις υπολεκάνες του προηγούμενου βήματος από μορφή grid σε διανυσματική μορφή (Σχήμα 20).



Σχήμα 20: Οριοθέτηση υπολεκανών για κάθε τμήμα του υδατορεύματος σε διανυσματική μορφή.

- **Drainage Line Processing:** Μετατρέπει το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή grid σε διανυσματική (vector) μορφή (Σχήμα 21).



Σχήμα 21: Υδρογραφικό δίκτυο σε διανυσματική μορφή.

- **Adjoint Catchment Processing:** Ενοποιούνται οι ανάντη υπολεκάνες σε κάθε συμβολή του υδατορεύματος (Σχήμα 22).

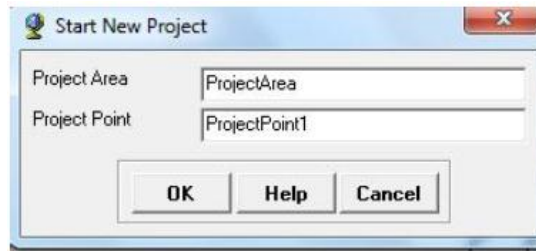


Σχήμα 22: Συσσωμάτωση υπολεκανών.

#### **2.2.4. Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου HEC– HMS**

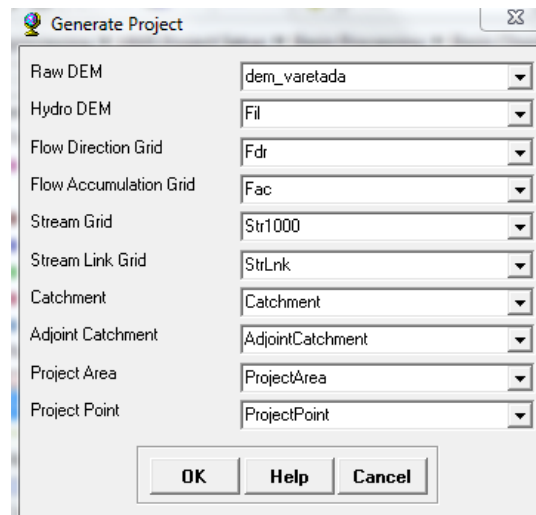
Το μενού HMS Project Setup από την εργαλειοθήκη του HEC – GeoHMS χρησιμοποιείται για να εξάγει αρχεία εισόδου για το HEC-HMS τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την μοντελοποίηση της βροχής σε απορροή.

Η διαδικασία αρχίζει με την εντολή “start new project” (Σχήμα 23).



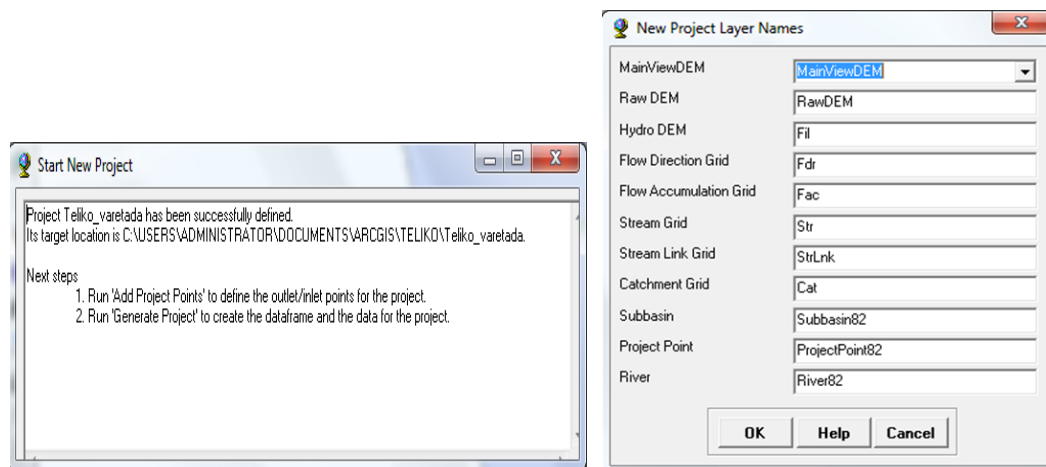
Σχήμα 23: Δημιουργία αρχείων εισόδου για το HEC-HMS.

Έπειτα, προσδιορίζουμε τις μήτρες δεδομένων για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τις αντίστοιχες θέσεις που θα έχουν στη δημιουργία του αρχείου υδρολογικής προσομοίωσης (Σχήμα 24).




Σχήμα 24: Αντιστοίχιση αρχείων εισόδου για τη δημιουργία υδρολογικής προσομοίωσης

Εφόσον οριστούν σωστά όλα τα αρχεία εισόδου εμφανίζεται στην οθόνη ένα μήνυμα με δύο οδηγίες (Σχήμα 25).



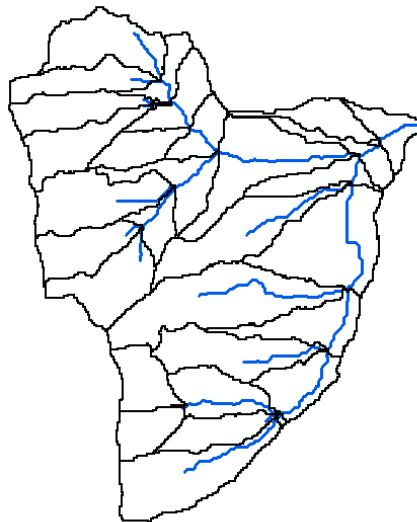
Σχήμα 25: Εντολές δημιουργίας σημείου εξόδου λεκάνης απορροής και έλεγχος αντιστοίχισης επιπέδων

Αρχικά ορίζεται το σημείο που βρίσκεται η έξοδος της λεκάνης με το εργαλείο «add project point»  και ακόλουθα με την εντολή Generate project σκιαγραφείται η περιοχή μελέτης, ενώ παράλληλα δημιουργείται η βάση γεωχωρικών δεδομένων ούτως ώστε να γίνει σωστή η αντιστοίχιση των επιπέδων.

Αφού ολοκληρωθεί η προεπεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και δημιουργηθεί το νέο project, ακολουθεί η δημιουργία υπολεκανών στα σημεία όπου υπάρχουν σταθμοί μέτρησης απορροών με σταθμηγράφους. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε μετρήσεις μόνο από έναν σταθμηγράφο που βρίσκεται στην έξοδο της λεκάνης αλλά για καλύτερη μετέπειτα υδρολογική προσομοίωση δημιουργήθηκαν (3) τρεις υπολεκάνες οι οποίες συνδέθηκαν μεταξύ τους με κόμβους. Η ενέργεια αυτή έγινε με τη χρήση του εργαλείου της εργαλειοθήκης Geo-HMS.

Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση των ακόλουθων εντολών :

- **Basin Processing – Basin Merge:** Με το εργαλείο select του ArcMap, επιλέγονται δύο γειτονικές λεκάνες όπου πατώντας Basin Merge, το λογισμικό αναγνωρίζει τη γειτνίασή τους και τις συνενώνει σε μία καινούρια υπολεκάνη. Η διαδικασία αυτή γίνεται αρκετές φορές έως ότου δημιουργηθεί ο επιθυμητός αριθμός υπολεκανών στην περιοχή μελέτης. Παράδειγμα αποτελεί το παρακάτω Σχήμα 26 στην αρχή της εν λόγω διαδικασίας.



Σχήμα 26: Εκτέλεση εντολής Basin Merge.

### 2.2.5. Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών της λεκάνης

Σε αυτό το στάδιο μέσω των εντολών του μενού Basin Characteristics υπολογίζονται διάφορα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών που απαρτίζουν τη λεκάνη.

Αυτά είναι το μήκος και η κλίση του ποταμού, η κλίση της λεκάνης απορροής και το μήκος του μεγαλύτερου υδατορεύματος σε κάθε μια από τις υπολεκάνες της υπό μελέτη λεκάνης. Ακόμη υπολογίζονται το κέντρο βάρους και το υψόμετρο του σε κάθε υπολεκάνη απορροής καθώς και η απόσταση του κέντρου βάρους της κάθε υπολεκάνης κατά μήκος του μεγαλύτερου υδατορεύματος από την έξοδο της.

#### **2.2.6. Τελικό στάδιο επεξεργασίας και προετοιμασία για εξαγωγή δεδομένων εισόδου για το HEC – HMS**

Το τελευταίο στάδιο προεπεξεργασίας των γεωχωρικών δεδομένων για εισαγωγή στο πρόγραμμα υδρολογικής προσομοίωσης HEC – HMS δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τις υδρολογικές διεργασίες (πρότυπο υπολογισμού απωλειών, υπολογισμού επιφανειακής απορροής, βασικής απορροής και τρόπου διόδευσης) με τις οποίες θα γίνει η υδρολογική προσομοίωση. Ωστόσο δεν είναι απαραίτητο γιατί μπορεί να πραγματοποιηθεί και μέσα από το περιβάλλον λειτουργίας του HMS. Έτσι ακολουθείται η διαδικασία από το μενού HMS της εργαλειοθήκης HEC – GeoHMS:

- Map to HMS Units: Μετατροπή των δεδομένων σε συμβατές μονάδες (S.I.) για το HMS
- Check Data: Έλεγχος δεδομένων (επιβεβαίωση από σχετικό εξαγόμενο αρχείο (.txt) )
- HMS Schematic: Αποτύπωση της συνδεσιμότητας κόμβων και των διαύλων
- HMS Legend: Αποτύπωση των κόμβων και διαύλων με εικονίδια υπομνήματος από το HEC-HMS
- Add Coordinates: Προσθήκη συντεταγμένων στα στοιχεία του μοντέλου
- Prepare Data for model export: Προετοιμασία δεδομένων για την εξαγωγή των στοιχείων σε πρότυπο αρχείο ανάγνωσης HMS.
- Basin Model File: Εξαγωγή και αποθήκευση αρχείου εισόδου λεκάνης απορροής σε μορφή αναγνώσιμη από το HMS.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

---

### 3. Το λογισμικό HEC-HMS

#### 3.1 Το Μοντέλο HEC-HMS

#### 3.2 Χρονικός έλεγχος υδρολογικής προσομοίωσης

#### 3.3 Υπολογισμός απωλειών

#### 3.4 Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής

#### 3.5 Πρότυπο υπολογισμού διόδευσης

#### 3.6 Πρότυπο υπολογισμού βασικής απορροής

### 3. Το λογισμικό HEC-HMS - Γενικά

Η μελέτη της συμπεριφοράς των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μια λεκάνη απορροής είναι αρκετά πολύπλοκη. Η κατανόηση των φυσικών φαινομένων και η κατά το δυνατό ποσοτική και ποιοτική εκτίμηση τους κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης, δεν επαρκούν για την ακριβή προσομοίωση των αποτελεσμάτων. Η μελέτη αυτή διευκολύνεται ιδιαίτερα με την χρήση κατάλληλα σχεδιασμένων προγραμμάτων για υδρολογική προσομοίωση, τα οποία υπολογίζουν με μεγάλη ακρίβεια την απόκριση μιας λεκάνης σε ένα γεγονός κατακρήμνισης, αφού πρώτα περιγραφεί η λεκάνη και τα φυσικά και τεχνητά χαρακτηριστικά της.

Ως υδρολογικό μοντέλο ορίζεται 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 δύναται να περιγράψουν (Μαμάσης, 2009) :

- Μεμονωμένα γεγονότα, όπως ένα υδρογράφημα ή την αιχμή μιας πλημμύρας όπου, η αναπαράσταση του γεγονότος γίνεται μέσω εμπειρικών προσεγγίσεων (μοναδιαίο υδρογράφημα), όπου αγνοούνται υδρολογικές συνιστώσες που δεν αφορούν τη μελέτη όπως εξάτμιση και διήθηση.
- Τη διαχρονική εξέλιξη του υδρολογικού ισοζυγίου μιας πεπερασμένης χωρικής ενότητας (λεκάνης απορροής), λαμβάνοντας υπόψη τις κύριες διεργασίες που επηρεάζουν τον κύκλο του νερού στην περιοχή.

Τα υδρολογικά μοντέλα κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με:

- Το πεδίο εφαρμογής τους
  - ✓ Λεκάνη απορροής
  - ✓ Υδροφορέας
  - ✓ Συνδυασμένη προσομοίωση επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών
- Τη χωρική τους κλίμακα
  - ✓ Αδιαμέριστη ή συγκεντρωτική
  - ✓ Ημικατανεμημένη
  - ✓ Ημιαδιαμέριστη
  - ✓ Κατανεμημένη
- τη μαθηματική τους δομή
  - ✓ Μοντέλα φυσικής βάσης
  - ✓ Εννοιολογικά

- ✓ Στατιστικά-Στοχαστικά
- ✓ « Μαύρου Κουτιού»
- τη χρονική διακριτότητα τους.
  - ✓ Μεγάλης κλίμακας
  - ✓ Μικρής κλίμακας

### **3.1. Το Μοντέλο HEC-HMS**

Το υδρολογικό μοντέλο HEC – HMS δημιουργήθηκε από το Κέντρο Τεχνικής Υδρολογίας του Ινστιτούτου Υδατικών Πόρων που ανήκει στο Σώμα Μηχανικού του Αμερικανικού Στρατού και σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο, ώστε να προσομοιώνει τις υδρολογικές διαδικασίες βροχής απορροής για δενδριτικού τύπου λεκάνες απορροής. Είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε να εφαρμόζεται σε μια μεγάλη ποικιλία γεωγραφικών περιοχών, τόσο δηλαδή σε μεγάλες λεκάνες απορροής όσο και σε μικρές αστικές ή φυσικές.

Τα υδρογραφήματα που παράγονται από αυτό, χρησιμοποιούνται απευθείας ή σε συνδυασμό με άλλα λογισμικά για μελέτες που αφορούν τη διαθεσιμότητα του νερού, την αστική αποστράγγιση, την πρόγνωση των πλημμυρών, τυχόν επιπτώσεις μελλοντικής αστικοποίησης, το σχεδιασμό του υπερχειλιστή ενός φράγματος, τη μείωση των καταστροφών από πλημμύρες, τη διευθέτηση περιοχής κατάκλισης πλημμύρας κ.α.

Το HEC-HMS είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο που χωρίζει τον υδρολογικό κύκλο σε επιμέρους τμήματα, ώστε ο κάθε χρήστης να έχει την δυνατότητα να επιλέξει για το κάθε τμήμα τον τρόπο προσομοίωσης που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της μελέτης του. Κάθε φορά η επιλογή του χρήστη κρίνεται από την εμπειρία και τις γνώσεις που έχει πάνω στο αντικείμενο, στο φυσικό σύστημα που πρόκειται να μοντελοποιήσει και στα διαθέσιμα δεδομένα για την περιοχή.

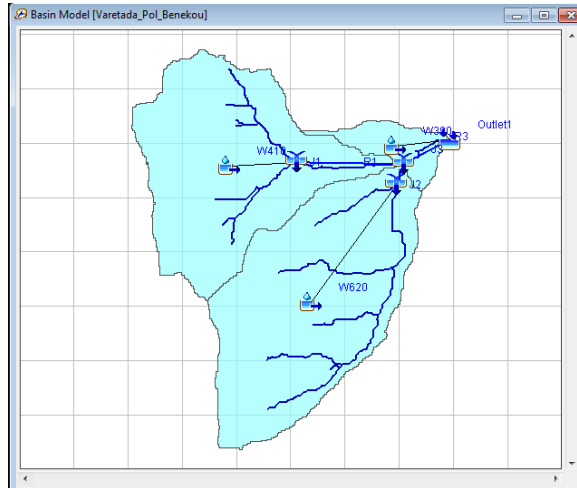
Τα μαθηματικά πρότυπα που διατίθενται στο HEC-HMS κατ' αντιστοιχία με τις διαδικασίες που περιγράφει χωρίζονται σε:

- Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης
- Πρότυπα εκτίμησης απωλειών βροχής
- Πρότυπα υπολογισμού βασικής απορροής
- Πρότυπα υπολογισμού άμεσης απορροής
- Πρότυπα διόδευσης πλημμυρογραφήματος



### 3.1.1. Μοντέλο λεκάνης απορροής (Basin Model)

Πρώτο βήμα είναι η εισαγωγή του μοντέλου της λεκάνης απορροής όπως αυτό υπολογίστηκε με τη βοήθεια της επέκτασης HEC – GeoHMS του ArcGIS. Η εισαγωγή έγινε με τη χρήση των ακόλουθων εντολών: File > Import > Basin Model. Επιλέγεται το αρχείο με κατάληξη «.basin» και εμφανίζεται στην οθόνη ο χάρτης της λεκάνης απορροής (Σχήμα 27).



Σχήμα 27: Μοντέλο λεκάνης απορροής σε περιβάλλον HEC-HMS.

Τα παραπάνω εικονίδια ερμηνεύονται ως εξής:



Σύνδεσμος – κόμβος



Υπολεκάνη



Έξοδος

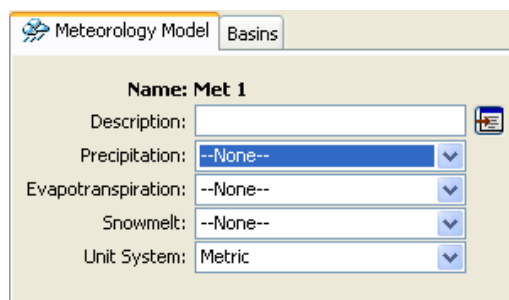
### 3.1.2. Μετεωρολογικό Μοντέλο

Μετά την εισαγωγή του μοντέλου της λεκάνης, επόμενη ενέργεια είναι η εισαγωγή της μετεωρολογικής πληροφορίας στο λογισμικό.

Τα Μετεωρολογικά μοντέλα (Meteorologic models) είναι ένα από τα κύρια συστατικά στη δημιουργία ενός project στο HEC - HMS. Σκοπός τους είναι να προετοιμάζουν τις μετεωρολογικές συνοριακές συνθήκες (εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων) των υπολεκανών μιας λεκάνης απορροής (Subbasins) κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Ένα Μετεωρολογικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιαδήποτε υπολεκάνη (Subbasin) του project , σε όποιο μοντέλο λεκάνης (basin model) και αν αυτή ανήκει.

Ένα Μετεωρολογικό μοντέλο (Meteorologic model) στο HEC - HMS δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει δεδομένα για κάθε ένα από τα τρία επιμέρους συστατικά (Σχήμα 28):

- 1.Βροχόπτωση (Precipitation)
- 2.Εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration)
- 3.Τήξη χιονιού (Snowmelt)

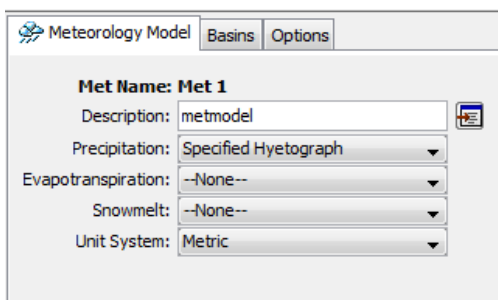


Σχήμα 28: Δημιουργία μετεωρολογικού μοντέλου στο HEC-HMS

Στο HEC – HMS υπάρχουν επτά διαφορετικοί μέθοδοι μέσω των οποίων μπορούμε να εισάγουμε τα βροχομετρικά δεδομένα. Η μόνη περίπτωση στην οποία δεν χρειάζεται να εισάγουμε δεδομένα βροχής είναι όταν το μοντέλο της λεκάνης (basin model) που επεξεργαζόμαστε δεν έχει καμία υπολεκάνη (subbasin). Ανάλογα με την πηγή προέλευσης των βροχομετρικών δεδομένων, επιλέγουμε την πλέον κατάλληλη μέθοδο εισαγωγής αυτών, στο μοντέλο μας. Ασχέτως με τη μέθοδο εισαγωγής των βροχομετρικών δεδομένων στο μοντέλο το αποτέλεσμα στο HEC – HMS είναι ένα νετόγραμμα για κάθε μια από τις υπολεκάνες (subbasins) του project.

Στην παρούσα εργασία, η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της βροχόπτωσης είναι αυτή του Καθορισμένου Υετογράμματος (Specified Hyetograph method). Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει την ακριβή χρονοσειρά που θα χρησιμοποιηθεί ως νετόγραμμα από τις υπολεκάνες. Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη στην περίπτωση που τα δεδομένα ενός βροχομετρικού σταθμού μπορούν να περιγράψουν εξ ολοκλήρου μια υπολεκάνη (subbasin). Τα επεισόδια που επιλέχθηκαν για την αρχική προσομοίωση είναι τα: 01/12/1998, 21/12/1998, 09/01/2001, 05/09/2001.

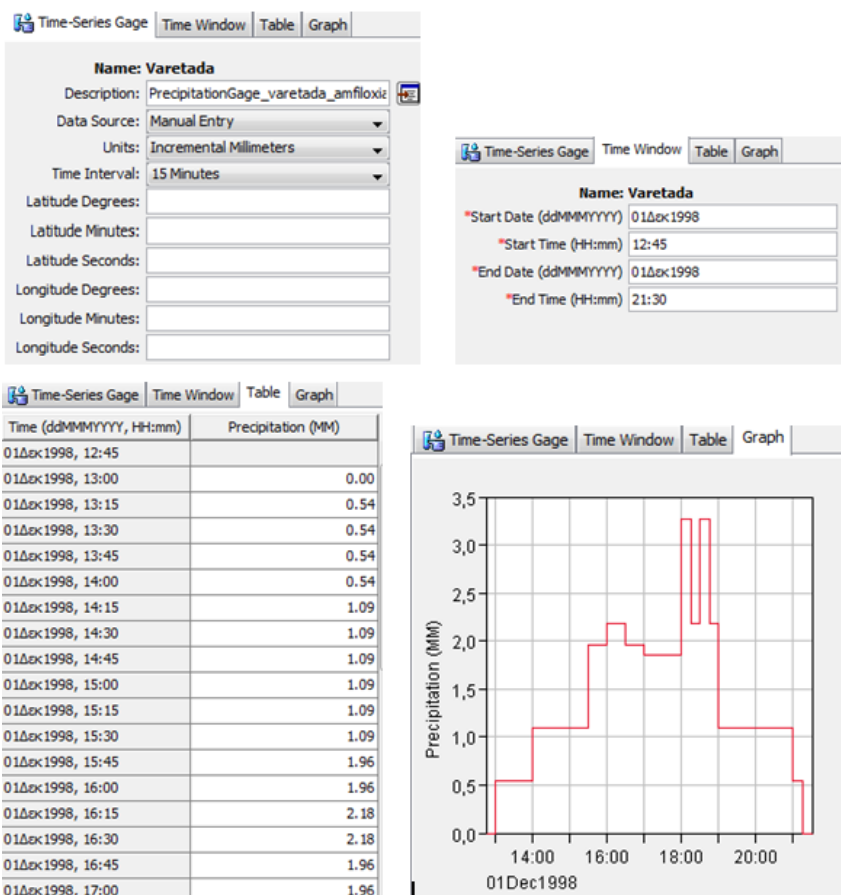
Από το μενού του HEC-HMS – Components – Meteorologic Model εισάγουμε το μετεωρολογικό μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε (Σχήμα 29).



Σχήμα 29: Ορισμός μετεωρολογικού μοντέλου.

Έπειτα εισάγουμε τα βροχομετρικά δεδομένα με μορφή χρονοσειράς από το μενού HEC-HMS – Components – Time Series Data Management – New (Σχήμα 30)

- **Time window:** Καθορισμός επεισοδίου βροχής π.χ. 24 hr. με χρονικό βήμα 15min.
- **Table:** Εισαγωγή χρονοσειράς
- **Graph:** Διάγραμμα Υετογραφήματος
- **Time series gage:** Εισαγωγή δεδομένων χρονοσειράς είτε χειροκίνητα είτε μέσω αρχείου dss. Στην συγκεκριμένη περίπτωση έγινε χειροκίνητα.



Σχήμα 30: Εισαγωγή βροχομετρικών δεδομένων.

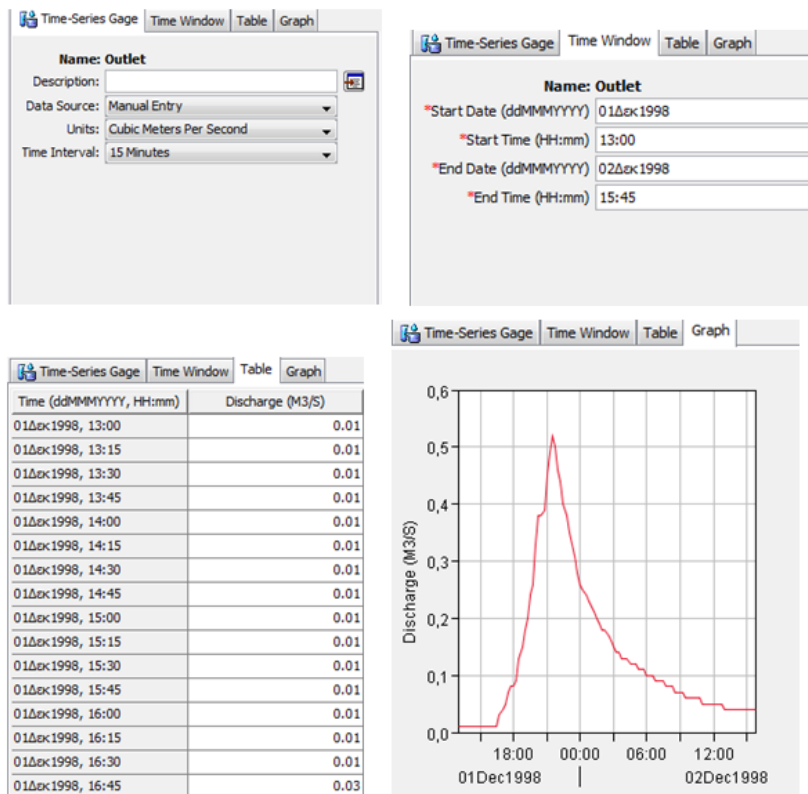
### 3.2. Χρονικός έλεγχος υδρολογικής προσομοίωσης

Στο μενού Control Specifications ( Σχήμα 31) γίνεται ο καθορισμός των χρονικών ορίων της προσομοίωσης στο μοντέλο HEC – HMS. Ο βασικός στόχος αυτού του βήματος είναι να ελέγχει πότε μια προσομοίωση ξεκινά και πότε να τελειώνει καθώς και το χρονικό βήμα που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση.

Σχήμα 31: Ορισμός χρονικού ελέγχου υδρολογικής προσομοίωσης.

#### 3.2.2. Εισαγωγή δεδομένων των παρατηρημένων παροχών

Η εισαγωγή των χρονοσειρών των παρατηρημένων παροχών εισάγονται στο HEC–HMS από το μενού: Components – Time Series Data Manager – Data Type: Discharge Gages (Σχήμα 32).



Σχήμα 32: Εισαγωγή μετρήσεων παροχής.

Και αφού εισαχθούν τα δεδομένα από κάθε σταθμηγράφο, αυτά πρέπει να αντιστοιχιστούν με τον συγκεκριμένο κόμβο (junction) μέσω του οποίου διέρχεται η παροχή κατά τη μοντελοποίηση του φυσικού συστήματος ώστε να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια στο στάδιο της βαθμονόμησης.

### **3.3. Υπολογισμός απωλειών**

Μετά την πτώση των κατακρημνισμάτων στην επιφάνεια της γης και πριν το σχηματισμό της απορροής, αρχίζουν κάποιες διαδικασίες που συνεισφέρουν σ' αυτόν, γνωστές και ως απώλειες βροχής. Οι υδρολογικές απώλειες αποτελούν σημαντική παράμετρο του υδρολογικού κύκλου και υδρολογικού ισοζυγίου της περιοχής. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητος ο υπολογισμός τους ούτως ώστε να υπολογιστεί και το ύψος της ενεργού βροχόπτωσης που αποτελεί την απορροή.

Για την εκτίμηση των υδρολογικών απωλειών και κατ' επέκταση του περισσεύματος βροχής έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί αυτή της Soil Conservation Service (SCS). Επιπλέον λόγω του δασικού χαρακτήρα της λεκάνης κρίνεται απαραίτητο να υπολογιστούν χωριστά οι απώλειες της φυτοκόμης και αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το πρότυπο της δεξαμενής κατακράτησης (Canopy storage).

#### **3.3.1. Πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης.**

Συνήθως σε περίπτωση της προσομοίωσης ενός μεμονωμένου επεισοδίου βροχής το πρότυπο υπολογισμού δεξαμενής κατακράτησης δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί εισάγεται μέσα στη μέθοδο απωλειών βροχής (SCS). Στην προκειμένη περίπτωση λόγω του δασικού χαρακτήρα της λεκάνης και της πειραματικής της ιδιότητας κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί το πρότυπο υπολογισμού της δεξαμενής κατακράτησης.

Χρησιμοποιήθηκε η απλή μέθοδος υπολογισμού. Αυτή η μέθοδος είναι μία απλή αναπαράσταση της επιφάνειας των φυτών. Όλη η βροχόπτωση παρεμποδίζεται έως ότου η χωρητικότητα αποθήκευσης των φυτών είναι γεμάτη. Από την δεξαμενή αυτή, πραγματοποιείται και η εξατμισοδιαπνοή μέχρι να μην υπάρχει άλλο διαθέσιμο νερό. Σε περίπτωση που οι ανάγκες για εξατμισοδιαπνοή δεν έχουν ολοκληρωθεί από αυτή την δεξαμενή τότε η διαδικασία αυτή συνεχίζεται στην δεξαμενή του εδάφους.

Η μέθοδος έχει δύο αρχεία εισόδου, αυτό της αρχικής αποθήκευσης της δεξαμενής (σε ποσοστό επί τις εκατό) και αυτό της μέγιστης δυνατής αποθήκευσης της δεξαμενής κάθε υπολεκάνης (σε χιλιοστά).

Το Ινστιτούτο Μεσογειακών και Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ&ΤΔΠ), μας παραχώρησε δεδομένα που αφορούν τις προηγούμενες βροχοπτώσεις σε διάστημα 20 ημερών. Βάσει αυτών προσδιορίστηκαν οι τιμές εισόδου όσον αφορά την αρχική αποθήκευση. Έτσι, προκύπτει ότι για τα επεισόδια #1 και #2 η αρχική αποθήκευση του εδάφους είναι ίση με 40%, λόγω του ότι προηγήθηκαν αρκετά μεγάλες, για την περιοχή, βροχοπτώσεις της τάξης των 81mm. Τα χιλιοστά βροχής που έπεσαν στην λεκάνη πριν τα επεισόδια #3 και #4 είναι λιγότερα καθώς στο 5 ήμερο που έχει προηγηθεί είναι ίσα με 10mm και για τα δύο. Τέλος για το επεισόδιο #5 εισάγεται μηδενική τιμή, δεν έχουν προηγηθεί βροχοπτώσεις για διάστημα 3 μηνών. Η Μέγιστη Δυνατή Αποθήκευση (mm) για την περιοχή μελέτης έχει προσδιοριστεί, σε προηγούμενες μελέτες του ΙΜΔΟ&ΤΔΠ ίση με 1,98mm.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τα επεισόδια φαίνονται στον Πίνακα 9:

Πίνακας 4: Τιμές για το πρότυπο δεξαμενής κατακράτησης.

Επεισόδιο	Αρχική Αποθήκευση (%)	Μέγιστη Δυνατή Αποθήκευση (mm)
4/2/1998	40	1.98
1/12/1998	40	1.98
21/12/1998	20	1.98
9/1/2001	30	1.98
5/9/2001	0	1.98

Η εισαγωγή των δεδομένων έγινε μέσω του μενού Parameters- Canopy-Simple Canopy.

### 3.3.2. Εκτίμηση υδρολογικών ελλειμμάτων με τη μέθοδο της SCS

Η εκτίμηση του περισσεύματος της βροχής στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν ακριβείς μετρήσεις για τις διάφορες απώλειες αποτελεί ουσιαστικά ένα δύσκολο πρόβλημα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, η Υπηρεσία Συντηρήσεως Εδαφών των ΗΠΑ (Soil Conservation Service, SCS) παρουσίασε μια εμπειρική μέθοδο εκτίμησης της απορροής από μια δεδομένη βροχόπτωση, με την βοήθεια τριών μεταβλητών: του ύψους βροχοπτώσεως, της αρχικής καταστάσεως υγρασίας του εδάφους και του υδρολογικού συμπλόκου εδάφους – καλύμματος.

Η SCS χρησιμοποιεί τον αριθμό καμπύλης (Curve Number) για τον υπολογισμό των υδρολογικών απωλειών, στον οποίο ενσωματώνονται η κάλυψη και η χρήση γης.

Σύμφωνα με την SCS και όπως προαναφέρθηκε έγινε εκτίμηση ότι οι αρχικές απώλειες είναι ίσες με το 20% των συνολικών απωλειών, δηλαδή της διαφοράς

μεταξύ βροχής ( $h_r$ ) και του περισσεύματος βροχής ( $h_R$ ). Έτσι σύμφωνα με τη μέθοδο προκύπτει:

$$h_R = \frac{(h_r - 0.2S)^2}{h_r + 0.8S} \text{ για } h_r > 0.2S \text{ και αν } h_r < 0.2S, h_R = 0. \quad (2)$$

Η μέγιστη δυνατή κατακράτηση (συνολικές απώλειες)  $S$  συνδέεται με τον αριθμό καμπύλης CN (Curve Number) σύμφωνα με τη παρακάτω εξίσωση:

$$S(mm) = 254 \times \left( \frac{100}{CN} - 1 \right), \quad (3)$$

Ο αριθμός καμπύλης CN εξάγεται από πίνακες, ανάλογα με την αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους, τη διαπερατότητα του εδάφους και την υδρολογική κατάσταση.

- **Αρχική κατάσταση υγρασίας του εδάφους:**

Για να καθοριστεί η αρχική κατάσταση υγρασίας του λαμβάνεται υπ' όψιν το ύψος της βροχής που έλαβε χώρα στην υπό μελέτη περιοχή κατά το πενήθημερο χρονικό διάστημα που προηγήθηκε από την έναρξη της εξεταζόμενης βροχόπτωσης. Έτσι διακρίνονται τρεις κατηγορίες αρχικής καταστάσεως υγρασίας του εδάφους που δίδονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 5: Κατηγορίες αρχικής κατάστασης υγρασίας του εδάφους (Τσακίρης Γ., 1995)

Κατηγορία	Ύψος βροχοπτώσεως των 5 προηγούμενων ημερών (mm)	
	Χειμερινή περίοδος	Βλαστική περίοδος
I	<13	<35
II	13-28	35-53
III	>28	>53

Η κατηγορία I αντιστοιχεί σε σχετικά ξηρό έδαφος. Η κατηγορία II αντιστοιχεί σε συνήθεις συνθήκες υγρασίας και τέλος η κατηγορία III αντιστοιχεί σε σχετικά κορεσμένο έδαφος που έχει ως συνέπεια το μέγιστο της απορροής.

- **Υδρολογικό σύμπλοκο εδάφους-κάλυψης γης:**

Τα εδάφη ανάλογα με τη διαπερατότητα τους διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες κατά SCS (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006):

- ✓ **Κατηγορία A:** Εδάφη με υψηλή διηθητική ικανότητα και υψηλή διαπερατότητα (αμμώδη ή χαλικώδη), ακόμη και αν διαβραχούν διεξοδικά (πολύ χαμηλό δυναμικό απορροής).
- ✓ **Κατηγορία B:** Εδάφη με μέτρια διηθητική ικανότητα και διαπερατότητα (πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια).
- ✓ **Κατηγορία C:** Εδάφη με μικρή διηθητική ικανότητα και διαπερατότητα (εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου).
- ✓ **Κατηγορία D:** Εδάφη με πολύ χαμηλή διηθητική ικανότητα και διαπερατότητα (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 (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006):

- ✓ **Κατάσταση I:** Η κατάσταση κατά την οποία τα εδάφη είναι στεγνά, αλλά όχι στο σημείο μόνιμης μάρανσης και όταν λαμβάνει χώρα ικανή άροση 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.

Η SCS κατηγοριοποίησε τους αριθμούς CN ανάλογα με το υδρολογικό σύμπλοκο εδάφους – κάλυψης γης και έφτιαξε πίνακες που χρησιμεύουν για την προσδιορισμό του αριθμού καμπύλης ανάλογα με την κατάσταση υγρασίας και της χρήση γης. Για τον Ελλαδικό χώρο για συνθήκες υγρασίας τύπου II προκύπτει ο Πίνακας 11 (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006).



Πίνακας 6: Ενδεικτικοί αριθμοί καμπύλης CN για υδρολογική κατάσταση II.

Χρήση Γης	Κατηγορία Εδάφους			
	A	B	C	D
Καλλιεργούμενες εκτάσεις: προστατευόμενες	72	81	88	91
Καλλιεργούμενες εκτάσεις: μη προστατευόμενες	62	71	78	81
Βοσκότοποι ( μέτρια υδρολογική κατάσταση)	49	69	79	84
Βοσκότοποι ( φτωχή υδρολογική κατάσταση)	68	79	86	89
Δάση (φτωχή υδρολογική κατάσταση) καθόλου κάλυψη	45	66	77	83
Δάση (καλή υδρολογική κατάσταση) καλή κάλυψη	25	55	70	77
Ανοιχτοί χώροι : πάρκα , γκαζόν, γήπεδο γκολφ (καλή κατάσταση , >75% κάλυψη από πράσινο	39	61	74	80
Ανοιχτοί χώροι : πάρκα , γκαζόν, γήπεδο γκολφ (μέτρια κατάσταση , κάλυψη από πράσινο μεταξύ 50-75% )	49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές (85% αδιαπέρατο έδαφος)	89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατος έδαφος)	81	88	91	93
Περιοχές Κατοικίας ( μέσο % αδιαπέρατου εδάφους)				
65%	77	85	90	92
38%	61	75	83	87
30%	57	72	81	86
25%	54	70	80	85
20%	51	68	79	84
Δρόμοι (χώμα)	72	82	87	89
Δρόμοι (σκληρή επιφάνεια)	74	84	90	92
Δρόμοι (χαλίκι)	76	85	89	91
Δρομοι (οδόστρωμα και δίκτυο ομβρίων)	98	98	98	98

### 3.3.3. Υπολογισμός αρχικών απωλειών Ia

Η μεθοδολογία υπολογισμού απωλειών της SCS περιλαμβάνει και τον υπολογισμό των αρχικών απωλειών Ia. Η τιμή σε περίπτωση που δεν υπολογιστεί ανεξάρτητα ισούται με  $Ia = 0,2 S$ . Στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνονται τιμές του λόγου Ia/S (ή λ) από 0,05 έως 0,2. Στην περιοχή της πειραματικής λεκάνης υιοθετήθηκε η παραδοχή ότι η τιμή του λόγου ισούται  $Ia/S=0.2$  και είναι ίδια για όλες τις υπολεκάνες.

Λόγω έλλειψης χάρτη χρήσεων γης και υδρογεωλογικού χάρτη δεν ήταν εφικτό ο αριθμός καμπύλης CN να υπολογιστεί μέσω των ειδικών εργαλείων του λογισμικού ArcGIS και έτσι πρόεκυψε βιβλιογραφικά.

Σύμφωνα με δεδομένα που δόθηκαν από το ΙΜΔΟ&ΤΔΠ για την περιοχή όσον αφορά την αρχική κατάσταση υγρασίας τα επεισόδια #1 (04/02/1998), #2 (01/12/1998), #3 (21/12/1998), #5 (09/01/2001) κατατάσσονται στην κατάσταση II (Πίνακας 12), ενώ το #5 (05/09/2001) κατατάσσονται στην κατάσταση I.

Πίνακας 7: Τιμές CN, S, Ia για κατάσταση υγρασίας τύπου II.

Υπολεκάνη	CN	S	Ia/S	Ia
W620	77	75.87	0.20	15.17
W410	77	75.87	0.20	15.17
W390	77	75.87	0.20	15.17

Οι τιμές του CN για συνθήκες υγρασίας τύπου I υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CN_I = \frac{0.42 * CN_{II}}{1 - 0.0058 * CN_{II}} \quad (4)$$

Έτσι προέκυψαν οι τιμές για τα επεισόδια #2 και #6 όπως φαίνεται στον Πίνακα 13:

Πίνακας 8: Τιμές CN, S, Ia για κατάσταση υγρασίας τύπου I.

Υπολεκάνη	CN	S	Ia/S	Ia
W620	58	183.93	0.20	36.79
W410	58	183.93	0.20	36.79
W390	58	183.93	0.20	36.79

### 3.4. Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής.

Άμεση λέγεται η απορροή η οποία εισρέει στα επιφανειακά υδατορεύματα αμέσως μετά τη βροχόπτωση και αποτελείται από την επιφανειακή απορροή και ένα μέρος της υπεδάφιας. Είναι δε φυσική συνέπεια της ενεργού βροχής (περίσσειμα βροχόπτωσης) στη λεκάνη απορροής. Η ενεργός βροχόπτωση ισούται με τη συνολική βροχόπτωση μείον τις απώλειες. Έτσι, μπορεί να προσδιοριστεί ο όγκος της άμεσης απορροής, όχι όμως και η χρονική κατανομή της πλημμυρικής αιχμής. Γι αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν μέθοδοι που προσδιορίζουν το χρόνο, την τιμή της παροχής αιχμής, το χρόνο υστέρησης και τη διάρκεια της άμεσης απορροής.

Στην παρούσα εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν δύο πρότυπα για τον υπολογισμό της άμεσης απορροής, το Συνθετικό Αδιάστατο Υδρογράφημα της Soil Conservation Service (SCS Unit Hydrograph) και το Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder (SNYDER Unit Hydrograph).

#### 3.4.1. Το μοναδιαίο υδρογράφημα.

Το μοναδιαίο υδρογράφημα (MYΓ, UH) μιας λεκάνης απορροής, εισήχθηκε για πρώτη φορά στην υδρολογική ανάλυση από τον Sherman (1932). Το μοναδιαίο

υδρογράφημα είναι ορίζεται το υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους  $hr = 1\text{cm}$  (  $10\text{mm}$  ), που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη σε ολόκληρη την έκταση της υδρολογικής λεκάνης και έχει ομοιόμορφη ένταση (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006).

Οι βασικές παραδοχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι:

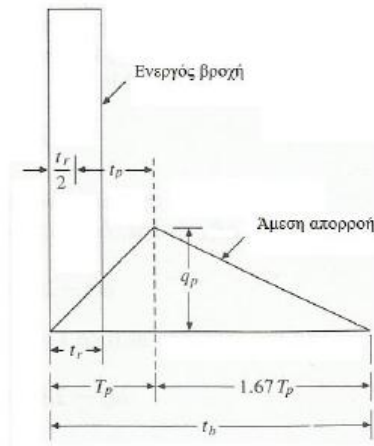
1. Σε δεδομένη υδρολογική λεκάνη, βροχές ίσης διάρκειας που προκαλούν απορροή, δίδουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με την ίδια περίπου χρονική βάση ανεξάρτητα από την ένταση της βροχής.
2. Σε δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από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

Οι δύο βασικές αρχές που διέπουν τη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι:

- **Αρχή της αναλογίας** σύμφωνα με την οποία 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** σύμφωνα με την οποία το συνολικό υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες ίσες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006).

### **3.4.2. Συνθετικό αδιάστατο υδρογράφημα της SCS**

Το αδιάστατο υδρογράφημα της SCS είναι ένα συνθετικό υδρογράφημα στο οποίο η απορροή της λεκάνης 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 ΜΥΓ,  $T_p$ . Με δεδομένα την παροχή αιχμής και τη χρονική επιβράδυνση για ορισμένη διάρκεια περισεύματος βροχής, το συνθετικό αδιάστατο μοναδιαίο υδρογράφημα μπορεί να υπολογιστεί για μια δεδομένη λεκάνη απορροής. Οι τιμές  $q_p$  και  $T_p$ , μπορούν να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο του ΜΥΓ, όπου ο χρόνος απόσυρσης λαμβάνεται ίσος με  $1.67 T_p$  όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 33 .



Σχήμα 33: Το Μοναδιαίο Υδρογράφημα της SCS (Μπαριάμης,2013).

Η περιοχή κάτω από το ΜΥ είναι ίση με την άμεση απορροή ισοδύναμης ενεργούς βροχής ύψους 1cm. Η παροχή αιχμής  $q_p$  είναι:

$$q_p = \frac{CA}{T_p} \quad (5)$$

όπου  $C = 2,08$  ( ή 483,4 στο Αγγλικό σύστημα μονάδων)  
και  $A =$  το εμβαδόν τη λεκάνης απορροής σε  $km^2$

### 3.4.3. Χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης

Για την περίπτωση υδρολογικών λεκανών, που τα μήκη διαδρομής είναι σχετικά μεγάλα και οι επιφάνειες τους παρουσιάζουν ανομοιομορφία, έχουν επινοηθεί διάφορες εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό του χρόνου συγκέντρωσης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η σχέση υπολογισμού της Soil Conservation Service (SCS).

$$t_c = \frac{L^{1.15}}{7700 * H^{0.38}} \quad (6)$$

όπου:  $t_c =$  χρόνος συγκέντρωσης της λεκάνης σε ώρες hr

$L =$  το μήκος του κυρίου υδατορεύματος σε ft

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

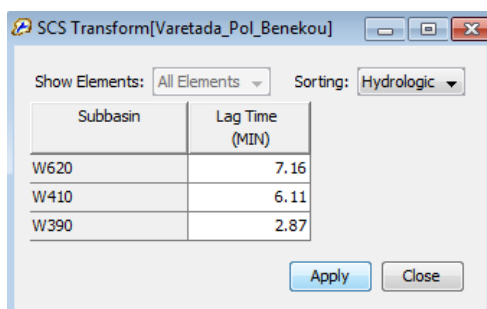
### 3.4.4. Εισαγωγή δεδομένων υπολογισμού άμεσης απορροής κατά SCS στο HEC – HMS

Από την γεωμορφολογική επεξεργασία που προηγήθηκε με τη βοήθεια του HEC – GeoHMS υπολογίστηκαν οι χρόνοι συγκέντρωσης για όλες τις υπολεκάνες σε min όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 14.

Πίνακας 9: Χρόνοι συγκέντρωσης υπολεκανών περιοχής μελέτης

Υπολεκάνη	L(ft)	H(ft)	t <sub>c</sub> (hr)	t <sub>p</sub> =0,6 t <sub>c</sub> (min)
W620	5668.56	948.81	0.20	7.16
W410	4762.00	850.21	0.17	6.11
W390	2254.97	648.49	0.08	2.87

Ο τρόπος εισαγωγής τους στο πρόγραμμα HEC – HMS γίνεται από το μενού Parameters – Transform – SCS Unit Hydrograph όπως φαίνεται στο Σχήμα 34.



Σχήμα 34: Χρόνοι υστέρησης υπολεκανών.

### 3.4.5. Συνθετικό Μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder

Ο Snyder το 1938 ασχολήθηκε με την ανάλυση των σχέσεων βροχόπτωσης – απορροής σε λεκάνες απορροής 30-30.000 km<sup>2</sup> στα Απαλάχια όρη στις ΗΠΑ. Έτσι ανέπτυξε μια μέθοδο κατασκευής συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος γνωστή ως μέθοδος Snyder, η οποία προσεγγίζει ικανοποιητικά τη χρονική βάση του (T), τη χρονική επιβράδυνση ή υστέρηση (t<sub>p</sub>) και την παροχή αιχμής Q<sub>p</sub> καθώς και τα πλάτη του ΜΥΓ W<sub>50</sub> και W<sub>75</sub> σε χρόνο που αντιστοιχεί στο 50% και στο 75% της αιχμής.

Οι τιμές των ανωτέρω παραμέτρων δίδονται από τους κάτωθι τύπους:

$$t_p = 0.752 \times C_t \times (L \times L_{ca})^{0.3} \quad (7)$$

όπου:

t<sub>p</sub>: Η χρονική επιβράδυνση (hr)

$L_{ca}$  = η απόσταση του σταθμού μέτρησης της παροχής στην έξοδο της λεκάνης από το κέντρο βάρους της λεκάνης κατά μήκος της κοίτης του κύριου υδατορεύματος έως το πλησιέστερο σημείο του κέντρου βάρους (km)

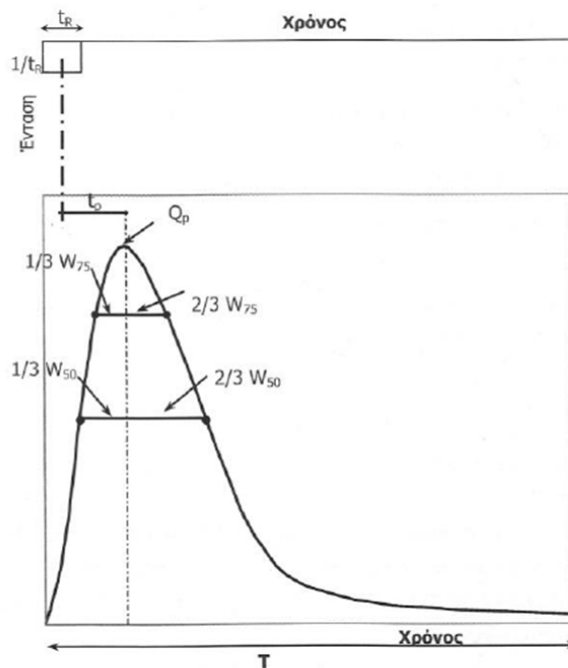
$L$  = η απόσταση του σταθμού μέτρησης παροχής ως τον υδροκρίτη, που μετρείται κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος (km)

$C_t$  = αδιάστατος συντελεστής που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης με εύρος τιμών από 1,8 έως 2,2. Για τιμές μεγάλων κλίσεων η τιμή του  $C_t$  τείνει προς τη χαμηλότερη τιμή.

$C_p$  = αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τις μονάδες και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης με εύρος τιμών από 0,56 έως 0,69.

$A$  = η έκταση της λεκάνης ( $km^2$ )

$T$  = η χρονική βάση του υδρογραφήματος. Ως ελάχιστη τιμή από την εξίσωση δίδονται οι 3 ημέρες



Σχήμα 35: Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα κατά Snyder (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006)

Η διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης  $t_R$  (hr) η οποία συνδέεται τη χρονική υστέρηση  $t_p$  δίνεται από τη σχέση:

$$t_R = \frac{t_p}{5.5} \quad (9)$$

όπου:

$t_R$ : Η διάρκεια της βροχόπτωσης (hr)

$t_L$ : Η χρονική επιβράδυνση (hr)

Εάν το ζητούμενο ΜΥΓ έχει διάρκεια βροχόπτωσης  $t_R$  μεγαλύτερη της  $t_R$ , ο χρόνος υστέρησης υπολογίζεται από νέα εξίσωση:

$$t_{p'} = t_p + 0.25(t_R - t_p) \quad (10)$$

Εν συνεχεία υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές  $Q_p$  και  $T$ .

Τα πλάτη του ΜΥΓ παρέχονται από τις σχέσεις:

$$W_{50} = \frac{830}{q^{1.1}_p} \quad (11)$$

$$W_{75} = \frac{470}{q^{1.1}_p} \quad (12)$$

όπου:

$W_{50}$ : Το πλάτος του ΜΥΓ σε ύψος 50% της παροχής αιχμής

$W_{75}$ : Το πλάτος του ΜΥΓ σε ύψος 75% της παροχής αιχμής

Όπου  $q_p = Q_p / A$ , η παροχή αιχμής ανηγμένη στην επιφάνεια της λεκάνης  $A$ .

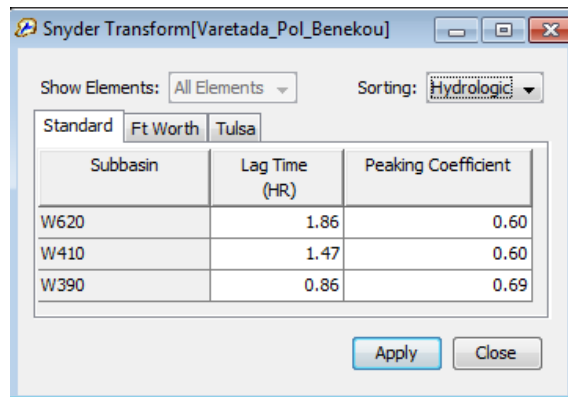
### 3.4.6. Εισαγωγή δεδομένων υπολογισμού άμεσης απορροής κατά Snyder στο HEC - HMS

Σύμφωνα με τα παραπάνω, απαιτούνται υπολογισμοί κυρίως για τον υπολογισμό του χρόνου υστέρησης αλλά και υπόθεση των παραμέτρων  $C_t$ ,  $C_p$  ώστε να εισαχθούν ως δεδομένα στο HEC – HMS (Πίνακας 15).

Πίνακας 10 : Υπολογισμοί παραμέτρων ΜΥΓ κατά Snyder

Υπολεκάνη	L(km)	$L_{ca}$ (km)	$C_t$	$C_p$	$t_p$ (hr)
W620	1.73	1.17	2	0.6	1.86
W410	1.45	0.64	2	0.6	1.47
W390	0.69	0.32	1.8	0.69	0.86

Τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στο HEC – HMS από το μενού Parameters – Transform – Snyder Unit Hydrograph όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 36.



Σχήμα 36: Εισαγωγή δεδομένων για υπολογισμό ΜΥΓ κατά Snyder στο HEC-HMS.

### 3.5. Πρότυπο υπολογισμού διόδευσης

Με τον όρο Διόδευση Πλημμύρας (Flood Routing) νοείται η διέλευση μιας πλημμύρας μέσω ενός επιφανειακού υδροφορέα (υδατόρευμα, ταμιευτήρας). Το πρότυπο υπολογισμού της διόδευσης δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να προσδιορίσει τη χωροχρονική μεταβολή ενός υδρογραφήματος μιας πλημμυρικής απορροής καθώς αυτό κινείται μέσω ενός ποταμού ή ενός ταμιευτήρα.

Γενικά, οι μέθοδοι διόδευσης πλημμυρών (Flood Routing Methods) μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες στις Υδραυλικές Μεθόδους Διόδευσης (Hydraulic Routing Methods) και στις Υδρολογικές Μεθόδους Διόδευσης (Hydrologic Routing Methods).

- **Οι υδραυλικές μέθοδοι** χρησιμοποιούν τις εξισώσεις ασταθούς ροής σε ανοικτούς αγωγούς. Η επίδραση της αποθήκευσης του ποταμού πάνω στο πλημμυρικό κύμα περιγράφεται με την εξίσωση της συνέχειας ενώ η επίδραση των ανωμαλιών και της τραχύτητας με την εξίσωση των ροπών.
- **Οι υδρολογικές μέθοδοι** βασίζονται στην εξίσωση συνέχειας και σε μια αναλυτική ή εμπειρική σχέση αποθήκευσης-απορροής του εξεταζόμενου συστήματος και στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης ως σχέσεις ανάμεσα στην αποθηκευτικότητα και την παροχή ή στάθμη σε τμήμα του ποταμού.

Συγκριτικά, οι υδραυλικές μέθοδοι συνήθως επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τις υδρολογικές, απαιτούν όμως πολλά και αξιόπιστα δεδομένα και μεγάλο υπολογιστικό φόρτο (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2006).

Στην παρούσα εργασία ως μέθοδος διόδευσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εκτίμησης του χρόνου υστέρησης - Lag routing. Είναι η πιο απλή από τις μεθόδους διόδευσης καθώς υπολογίζει μόνο το χρόνο μεταφοράς του πλημμυρικού κύματος και δεν περιλαμβάνει διαδικασίες εξασθένησης ή διάχυσης του. Χρησιμοποιείται κατά κύριο



λόγο σε μικρές λεκάνες απορροής με προβλέψιμο το χρόνο μεταφοράς του κύματος, που δεν ποικίλλει με το βάθος της ροής. Για την περιοχή μελέτης έγινε υπόθεση της μέσης ταχύτητας ροής του νερού ίση με 1 m/s. Με τη χρήση του GIS υπολογίστηκαν τα μήκη που διανύει το νερό από την έξοδο της μίας λεκάνης μέχρι την επόμενη. Έτσι έγινε εκτίμηση του lag time όπως φαίνεται στον Πίνακα 16.

Τα δεδομένα εισήχθησαν στο HEC-HMS από το μενού Parameters – Routing – Lag.

Πίνακας 11: Χρόνος υστέρησης για τη διόδευση του πλημμυρικού κύματος.

Υδατόρευμα	Μήκος Υδατορεύματος(m)	lag time (min)
R2	90.85	3.03
R1	446.3	14.88
R3	211.85	7.06

### 3.6. Πρότυπο βασικής απορροής.

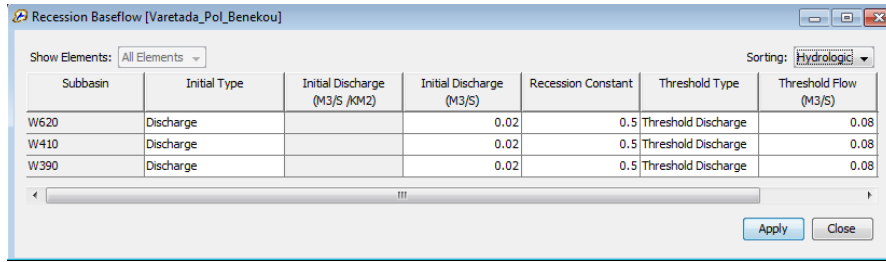
Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της βασικής απορροής είναι αυτή της εκθετικής μείωσης (recession method). Έχει σχεδιαστεί για να προσεγγίζει την τυπική συμπεριφορά που παρατηρείται στις λεκάνες απορροής όταν η ροή υποχωρεί εκθετικά μετά από μια έντονη βροχόπτωση.

Στην παρούσα εργασία το πρότυπο της βασικής απορροής χρησιμοποιήθηκε διότι η βασική απορροή ως συνιστώσα της απορροής έχει μικρή συνεισφορά στους συνολικούς όγκους. Επιλέχθηκε η μέθοδος της εκθετικής μείωσης λόγω της μικρής απαίτησης σε δεδομένα.

Όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 37, για κάθε υπολεκάνη πρέπει να οριστεί αρχικά η παροχή του υδατορεύματος πριν στην έναρξη του επεισοδίου σε ( $m^3/s$ ) (Initial Discharge), έπειτα ο σταθερός ρυθμός μείωσης της παροχής για την κάθε υπολεκάνη (Resecion Constant), στην προκειμένη περίπτωση είναι ίσος με 0,5 για όλες τις υπολεκάνες και τέλος η παροχή στην οποία το υδατόρευμα μόλις την αποκτήσει, αρχίζει να έχει τις εκθετικές απώλειες (Threshold Discharge).

Μέσω του μενού Parameters – Baseflow – Recession εισάγονται οι απαραίτητες τιμές για την προσομοίωση.

### Κεφάλαιο 3. Το λογισμικό HEC-HMS.



Σχήμα 37: Εισαγωγή δεδομένων στο πρότυπο βασικής απορροής με εκθετική μείωση HEC – HMS.

Να σημειωθεί ότι στην προκειμένη περίπτωση λόγω ύπαρξης ενός μόνο σταθμηγράφου στην λεκάνη απορροής, οι μετρήσεις που αφορούν τη βασική απορροή είναι ίδιες για όλες τις υπολεκάνες και αλλάζουν σύμφωνα με τις μετρήσεις που υπάρχουν ανά επεισόδιο όπως φαίνεται στον Πίνακα 17.

Πίνακας 12: Μετρήσεις βασικής απορροής ανά επεισόδιο.

Επεισόδιο	Αρχική Βασική απορροή (m <sup>3</sup> /s)	Σταθερά εκθετικής μείωσης	Όριο ροής (m <sup>3</sup> /s)
4/2/1998	0.02	0.5	0.08
1/12/1998	0.01	0.5	0.03
21/12/1998	0.01	0.5	0.06
9/1/2001	0.01	0.5	0.04
5/9/2001	0.00	0.5	0.00

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

---

- 4.** Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου HEC-HMS
  - 4.1** Προσομοίωση με βάση τη μέθοδο MY κατά SCS
  - 4.2** Προσομοίωση με βάση τη μέθοδο MY κατά SNYDER
  - 4.3** Βαθμονόμηση
  - 4.4** Αποτελέσματα Βαθμονόμησης
  - 4.5** Επαλήθευση μοντέλου

## **4. Βαθμονόμηση και επαλήθευση του μοντέλου HEC-HMS.**

Ο όρος υδρολογική προσομοίωση αντιστοιχεί στον τρόπο με τον οποίο συνδυάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά μιας λεκάνης απορροής με τα μετεωρολογικά της δεδομένα προκειμένου να προσομοιωθεί η υδρολογική συμπεριφορά του συνδυασμού αυτών των δύο.

Στο HEC - HMS αυτό σημαίνει συνδυασμό ενός μετεωρολογικού μοντέλου (Meteorologic model) με ένα μοντέλο λεκάνης (basin model) και με μια χρονική ρύθμιση χαρακτηριστικών προσομοίωσης (control specifications). Τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης συνίστανται από γραφήματα (graphs), συγκεντρωτικούς πίνακες (summary tables) και πίνακες χρονοσειρών (time – series tables) που εκφράζουν τις προκύπτουσες απορροές σε κάθε υδρολογικό στοιχείο (Hydrologic element) της λεκάνης απορροής.

Η διαδικασία αυτή, κατά την οποία δημιουργείται μια υδρολογική προσομοίωση στο HEC - HMS ονομάζεται τρέξιμο προσομοίωσης ( simulation run ).

### **4.1. Προσομοίωση με βάση τη μέθοδο μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS**

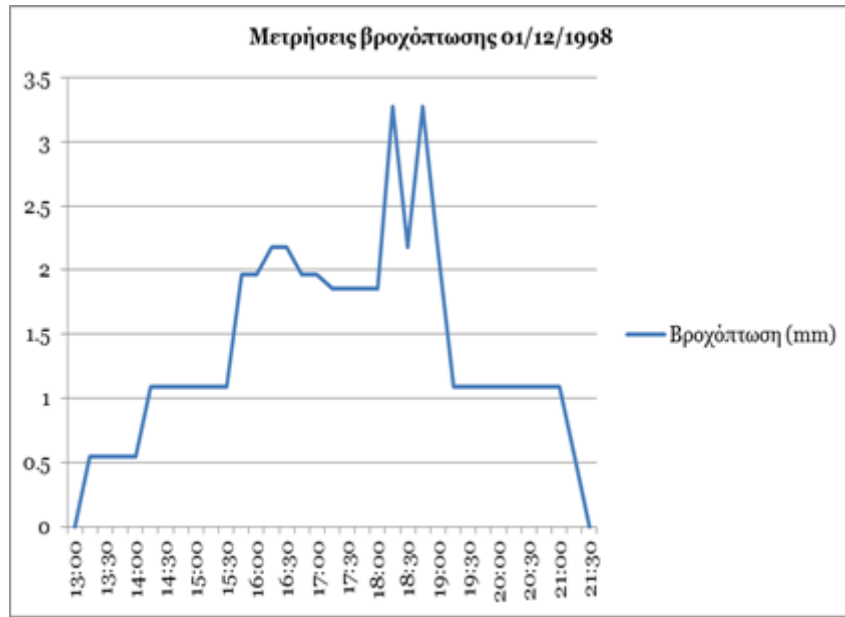
Αφού εισαχθούν οι αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου της υπό μελέτη λεκάνης απορροής, όπως περιγράφεται στα προηγούμενα κεφάλαια και στο εγχειρίδιο χρήσης του HEC-HMS, το πρόγραμμα είναι έτοιμο να ξεκινήσει το πρώτο τρέξιμο προσομοίωσης για το κάθε επεισόδιο ξεχωριστά και να εξάγει τα αρχικά αποτελέσματα σύμφωνα με αυτές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αρχική εκτίμηση των τιμών των παραμέτρων πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να πλησιάζουν όσο το δυνατό περισσότερο σε πραγματικά στοιχεία. Έτσι με τη βαθμονόμηση που θα ακολουθήσει να είναι πιο εύκολη η διαπίστωση αυτών.

Όλα τα υδρογραφήματα αφορούν μετρήσεις παρατηρημένης παροχής στην έξοδο της λεκάνης καθώς όπως έχει προαναφερθεί είναι ο μοναδικός σταθμός.

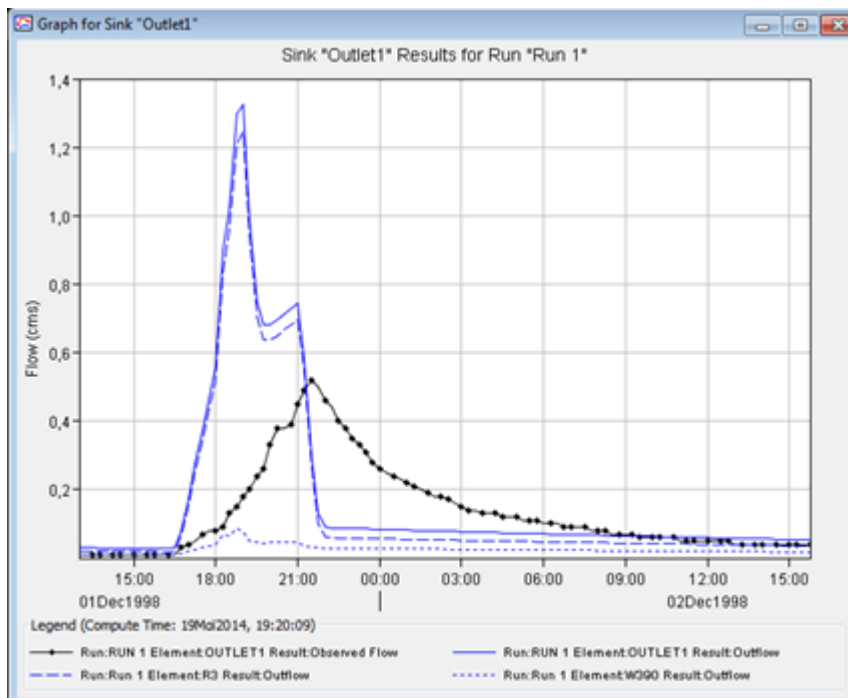
Τέλος πρέπει να γίνει σαφές ότι το πρώτο τρέξιμο της προσομοίωσης παρά την προσεκτική εκτίμηση των αρχικών τιμών εισόδου των παραμέτρων δεν είναι απόλυτα αξιόπιστο.

Παρακάτω παρατίθενται οι μετρήσεις της βροχόπτωσης όπως προκύπτουν από τον βροχογράφο, για το κάθε επεισόδιο με τα αντίστοιχα υδρογραφήματα της παροχής στην έξοδο της λεκάνης.

4.1.1 Επεισόδιο #2 – 01/12/1998

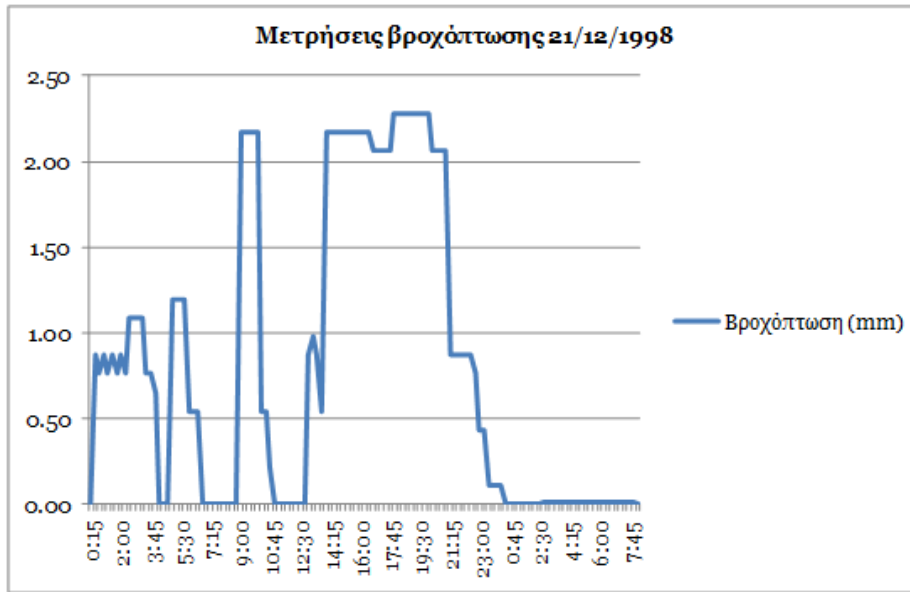


Σχήμα 38: Βροχομετρικά δεδομένα για το επεισόδιο#2.

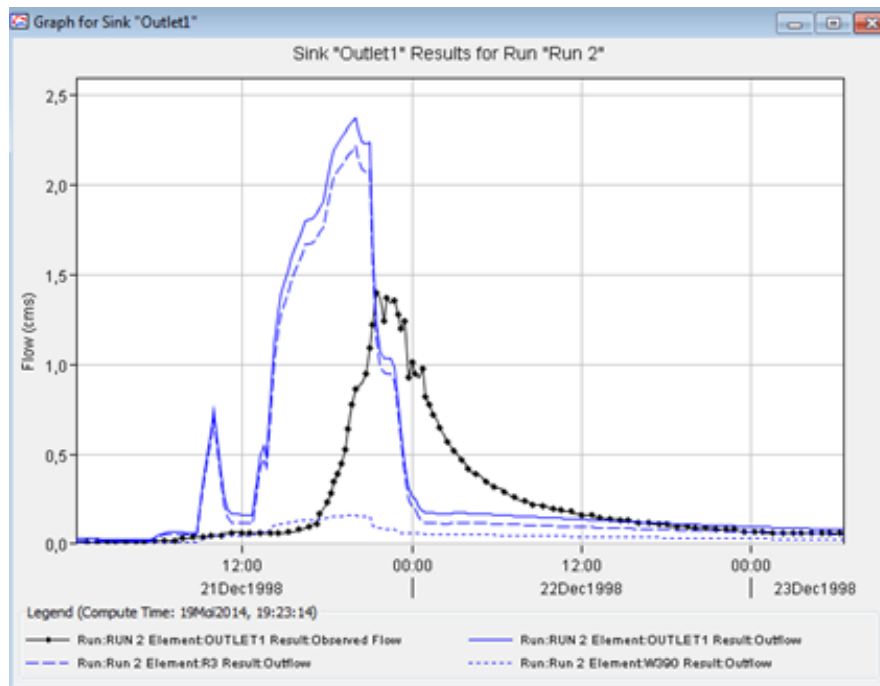


Σχήμα 39: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το επεισόδιο #2 στην έξοδο της λεκάνης (SCS)

### 4.1.2 Επεισόδιο #3 – 21/12/1998

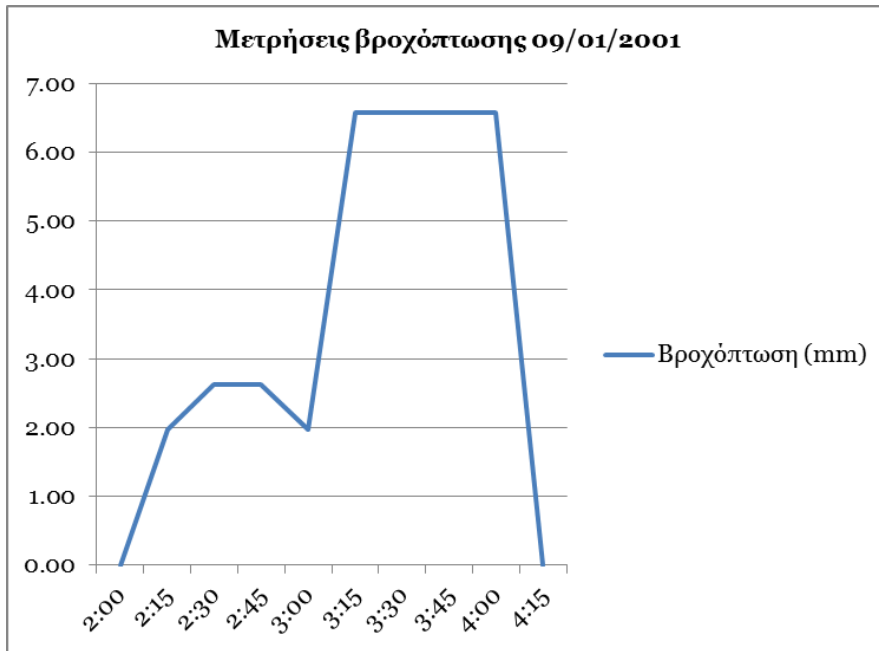


Σχήμα 40: Βροχομετρικά δεδομένα για το επεισόδιο #3.

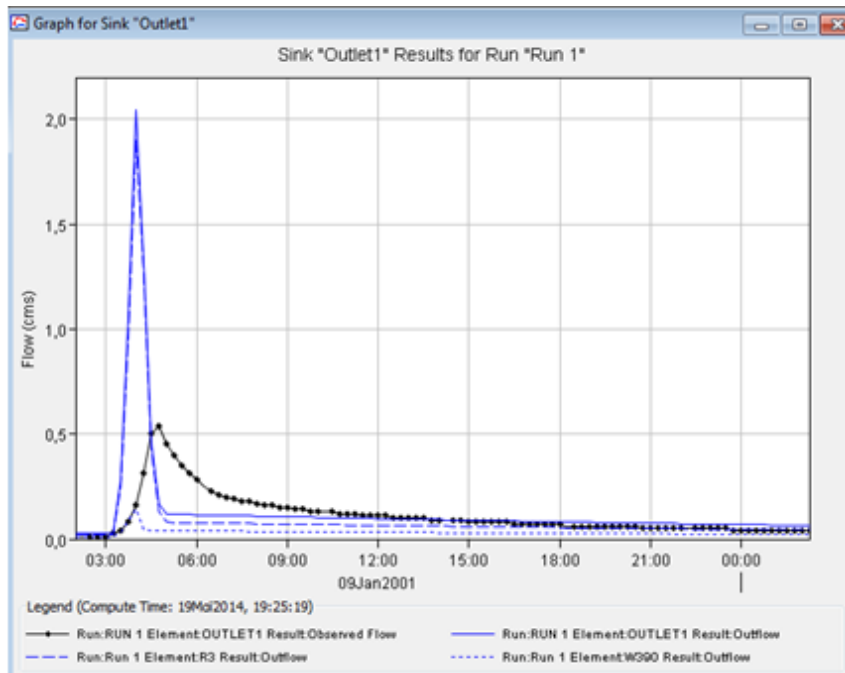


Σχήμα 41: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το επεισόδιο #3 στην έξοδο της λεκάνης (SCS)

**4.1.3. Επεισόδιο #4 – 09/01/2001**

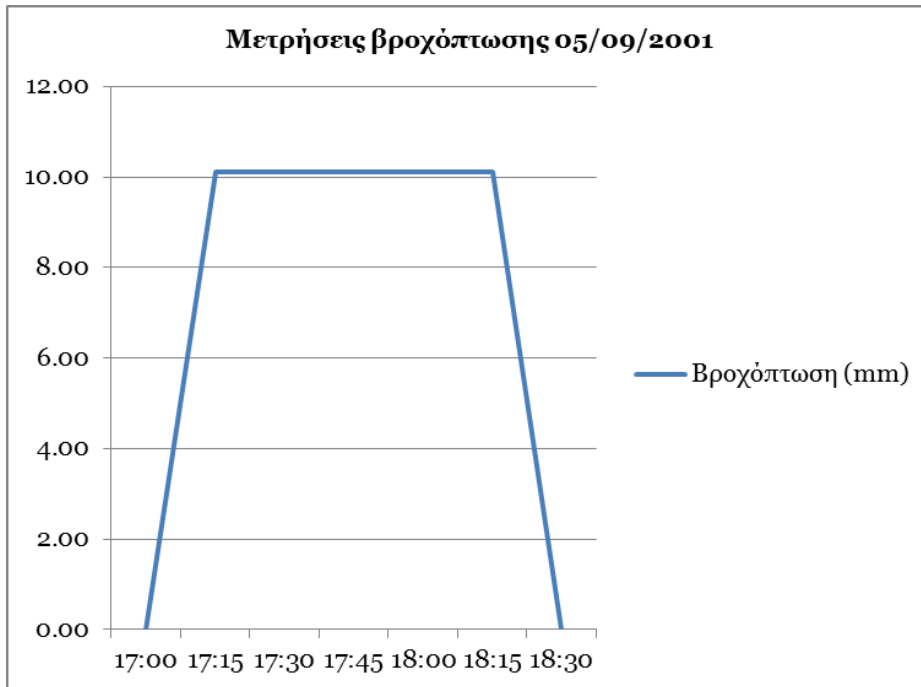


Σχήμα 42 : Βροχομετρικά δεδομένα για το επεισόδιο#4.

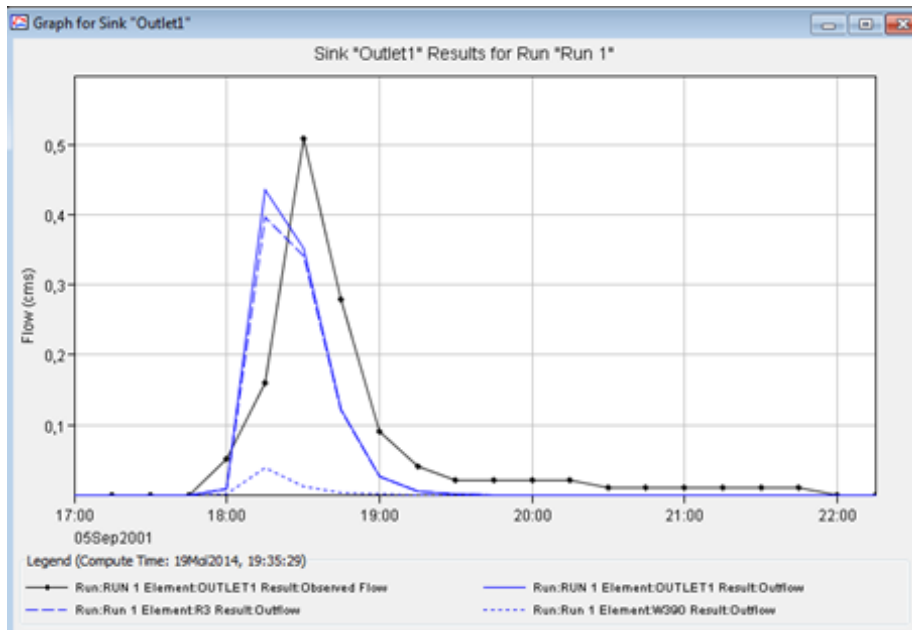


Σχήμα 43: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το επεισόδιο #4 στην έξοδο της λεκάνης (SCS)

4.1.4 Επεισόδιο #5 – 05/09/2001



Σχήμα 43 : Βροχομετρικά δεδομένα για το επεισόδιο#4.



Σχήμα 42: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το επεισόδιο #5 στην έξοδο της λεκάνης (SCS)



#### 4.1.5 Παρατηρήσεις επί των αρχικών αποτελεσμάτων

Όπως αναμενόταν τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης με τη μέθοδο SCS για τις αρχικές εκτιμήσεις των παραμέτρων αποκλίνουν αρκετά από τις παρατηρημένες μετρήσεις της παροχής τόσο ως προς τους συνολικούς όγκους που παρατηρούνται όσο και στις αιχμές. Με εξαίρεση το επεισόδιο #5 όπου οι αιχμές παρατηρούνται με μόλις 15 min διαφορά, τα υπόλοιπα τέσσερα δεν εμφανίζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Συγκεκριμένα, για το επεισόδιο #2 στον συνολικό όγκο παρατηρείται μετά την προσομοίωση αύξηση της τάξης του 29% ενώ η παροχή αιχμής ανεβαίνει κατά 150% με δυόμιση ώρες διαφορά στην εμφάνιση της αιχμής. Στο επεισόδιο #3, ο όγκος και η αιχμή που προκύπτουν από το πρώτο τρέξιμο της προσομοίωσης είναι αυξημένα κατά 71% και με χρονική διαφορά εμφάνισης της μέγιστης αιχμής κατά μια ώρα και σαράντα πέντε λεπτά. Μικρότερη εμφανίζεται η αύξηση του συνολικού όγκου για το επεισόδιο #4 καθώς είναι μόνο 21%, αντίθετα η αιχμή αυξάνεται σημαντικά. Τέλος, το επεισόδιο #5 είναι το μοναδικό που εμφανίζει μείωση του όγκου και της τιμής της παροχής αιχμής μετά την προσομοίωση κατά 20%.

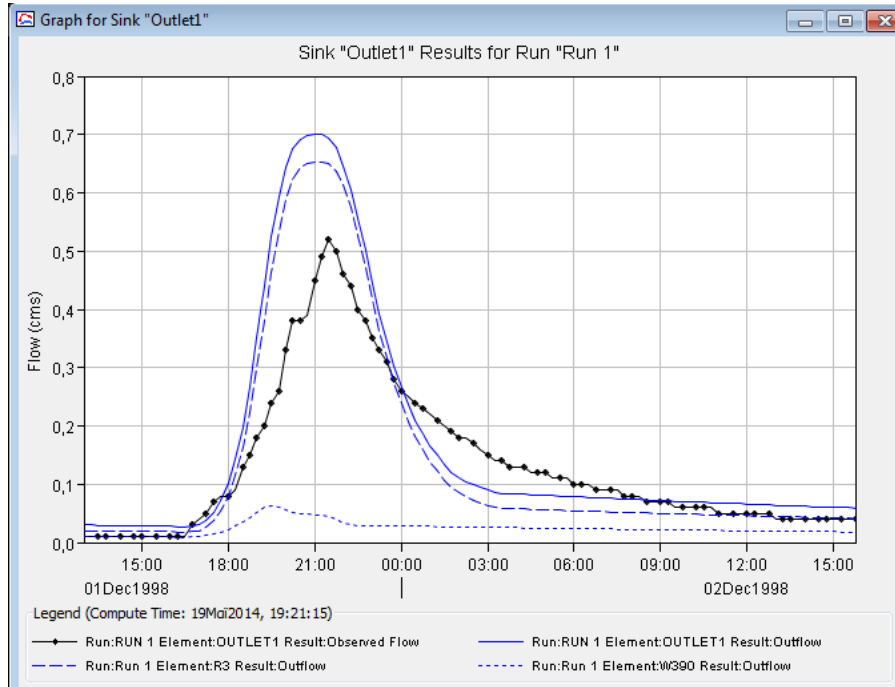
Συνοπτικά τα αρχικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 18.

Πίνακας 13: Συγκριτικά αποτελέσματα πρώτης προσομοίωσης με τη μέθοδο SCS.

SCS	Προσομοιωμένες Τιμές			Παρατηρημένες Τιμές		
	Σταθμός	Έξοδος			Έξοδος	
Επεισόδιο	Όγκος x 1000m <sup>3</sup>	Αιχμή (m <sup>3</sup> /s)	time_peak	Όγκος x 1000m <sup>3</sup>	Αιχμή (m <sup>3</sup> /s)	time_peak
2	17	1.3	01/12/1998-19:00	13.08	0.52	01/12/1998-21:30
3	80	2.4	21/12/1998-20:00	46.7	1.4	21/12/1998-21:30
4	11.8	2	09/01/2001-04:00	9.78	0.54	09/01/2001-04:45
5	0.9	0.4	05/09/2001-18:15	1.14	0.51	05/09/2001-18:30

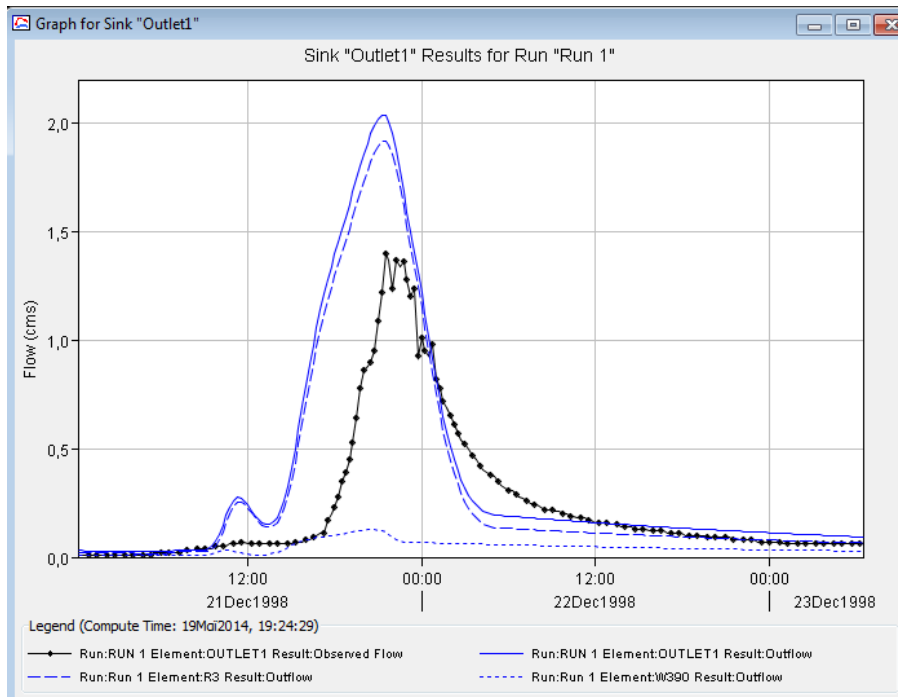
## 4.2. Προσομοίωση με βάση τη μέθοδο μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SNYDER

### 4.2.1. Επεισόδιο #2 – 01/12/1998



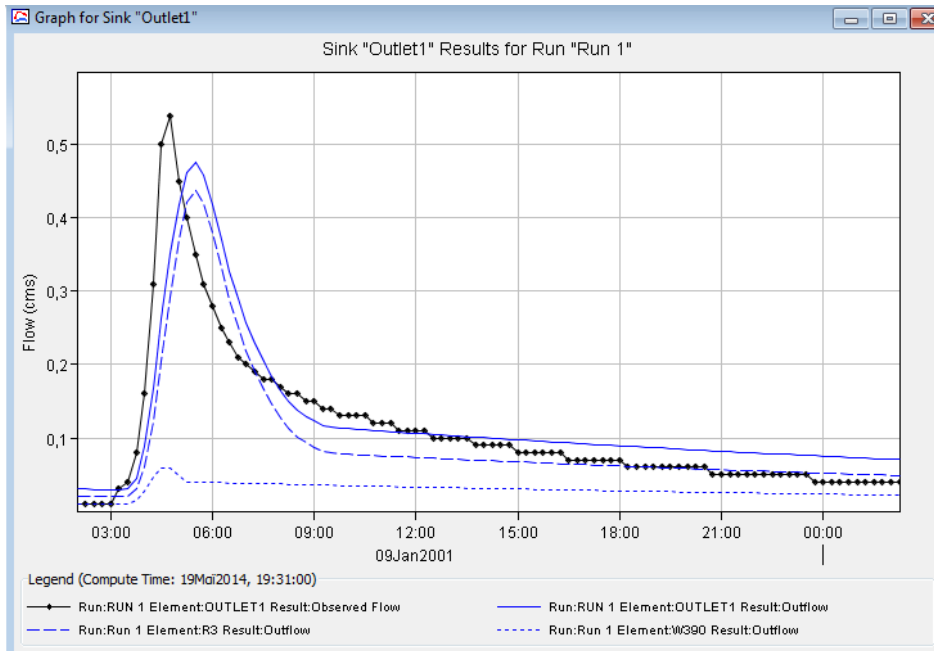
Σχήμα 43: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το επεισόδιο #2 στην έξοδο της λεκάνης (SNYDER)

### 4.2.2. Επεισόδιο #3 – 21/12/1998



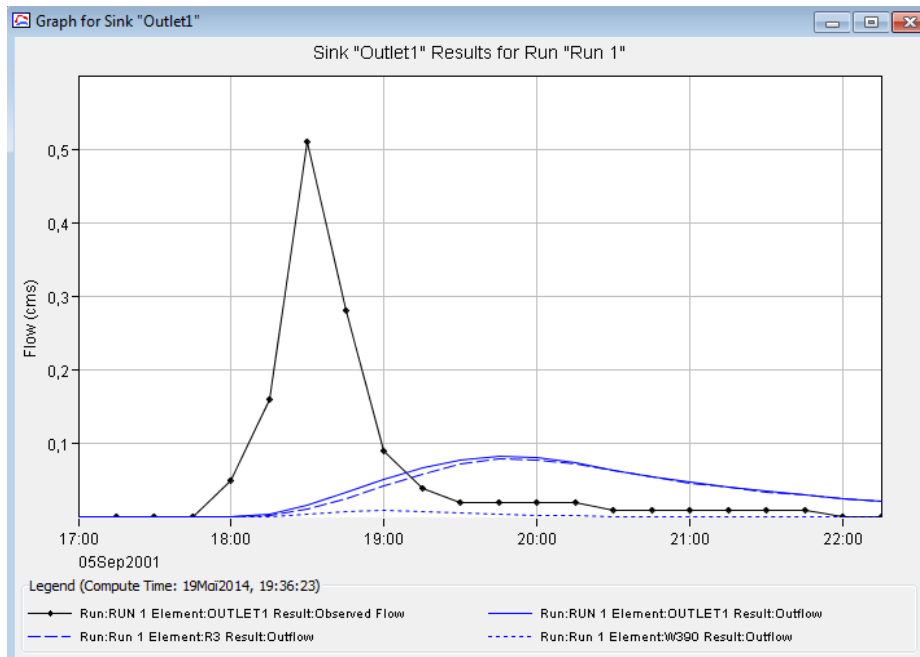
Σχήμα 44: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το επεισόδιο #3 στην έξοδο της λεκάνης (SNYDER).

#### 4.2.3. Επεισόδιο #4 – 09/01/2001



Σχήμα 45: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το επεισόδιο #4 στην έξοδο της λεκάνης (SNYDER)

#### 4.2.4. Επεισόδιο #5 – 05/09/2001



Σχήμα 46: Αποτελέσματα προσομοίωσης για το επεισόδιο #5 στην έξοδο της λεκάνης (SNYDER)

#### 4.2.5. Παρατηρήσεις επί των αρχικών αποτελεσμάτων

Με βάση τη μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο συνθετικού ΜΥ κατά Snyder για τις αρχικές εκτιμήσεις που έγιναν υπάρχουν

αποκλίσεις τόσο ως προς τους συνολικούς όγκους που προσομοιώνονται όσο και στις αιχμές. Παρατηρείται όμως ότι η χρονική στιγμή στην οποία παρουσιάζονται οι αιχμές είναι σχετικά επιτυχείς για τα επεισόδια #2 και #3 (αποκλίσεις από 15min έως 30min), ενώ στα επεισόδια #4 και #5 εμφανίζεται υστέρηση.

Συγκεκριμένα, για το επεισόδιο #2 στον συνολικό όγκο παρατηρείται μετά την προσομοίωση αύξηση της τάξης του 26% ενώ η παροχή αιχμής ανεβαίνει κατά 18% με μισή ώρα διαφορά στην εμφάνιση της αιχμής. Στο επεισόδιο #3, ο όγκος και η αιχμή που προκύπτουν από το πρώτο τρέξιμο της προσομοίωσης είναι αυξημένα κατά 60% και 43% αντίστοιχα και με χρονική διαφορά εμφάνισης της μέγιστης αιχμής κατά 15 λεπτά. Μικρότερη εμφανίζεται η αύξηση του συνολικού όγκου για το επεισόδιο #4 καθώς είναι μόνο 12%, ενώ η αιχμή παραμένει στα ίδια επίπεδα. Τέλος, το επεισόδιο #5 είναι και σ αυτή τη μέθοδο το μοναδικό που εμφανίζει μείωση του όγκου και της τιμής της παροχής αιχμής μετά την προσομοίωση.

Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι και στα τέσσερα επεισόδια που προσομοιώθηκαν, σύμφωνα πάντα με τις αρχικές εκτιμήσεις για τις παραμέτρους, παρατηρήθηκε ότι τόσο οι όγκοι όσο και οι αιχμές που υπολογίζονται με βάση τη μέθοδο SCS είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τη μέθοδο του συνθετικού υδρογραφήματος κατά Snyder. Συνοπτικά τα αρχικά αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 19.

Πίνακας 14: Συγκριτικά αποτελέσματα πρώτης προσομοίωσης με τη μέθοδο SNYDER

SNYDER	Προσομοιωμένες Τιμές			Παρατηρημένες Τιμές		
	Σταθμός	Έξοδος			Έξοδος	
Επεισόδιο	Όγκος x 1000m <sup>3</sup>	Αιχμή (m <sup>3</sup> /s)	time_peak	Όγκος x 1000m <sup>3</sup>	Αιχμή (m <sup>3</sup> /s)	time_peak
2	16.3	0.7	01/12/1998-21:00	12.97	0.52	01/12/1998-21:30
3	74.5	2	21/12/1998-21:15	46.7	1.4	22/12/1998-21:30
4	10.9	0.5	09/01/2001-05:30	9.78	0.54	09/01/2001-04:45
5	0.7	0.1	05/09/2001-19:45	1.14	0.51	05/09/2001-18:30

### 4.3 Βαθμονόμηση

Τα εννοιολογικά υδρολογικά ομοιώματα χρησιμοποιούν ως αρχεία εισόδου κάποιες παραμέτρους με σκοπό να προσομοιώσουν μέρος του φυσικού συστήματος. Μερικές από αυτές βασίζονται σε πολύπλοκες εξισώσεις. Είναι φανερό λοιπόν ότι είναι σχεδόν αδύνατο να μπορούν να αναπαραστήσουν πιστά το υδρολογικό σύστημα που μελετάται κάθε φορά. Αυτό γίνεται γιατί κάθε φορά το σύστημα διέπεται από ιδιαιτερότητες που δεν είναι δυνατό να ληφθούν υπόψη κατά τον αρχικό σχεδιασμό του μοντέλου. Λόγω αυτού του γεγονότος κάθε υδρολογικό σύστημα και κατ'

επέκταση φυσικό για την ορθή και ακριβή αναπαράσταση του, απαιτεί προηγουμένως τη ρύθμιση-βαθμονόμηση (calibration) του ομοιώματος.

Η βαθμονόμηση λοιπόν είναι μια συστηματική διαδικασία κατά την οποία, προσαρμόζονται οι τιμές των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να συγκλίνουν όσο το δυνατό περισσότερο με τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η τεχνητή προσαρμογή του μοντέλου στην πραγματικότητα και η πληρέστερη δυνατή αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών ενός υδατικού συστήματος. Η βαθμονόμηση ενός μοντέλου προϋποθέτει ένα επαρκές χρονικό διάστημα για το οποίο διατίθενται συστηματικές μετρήσεις (χρονοσειρές) απόκρισης του φυσικού συστήματος, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των ιστορικών με τα προσομοιωμένα δεδομένα. Ως μια συστηματική διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων του μοντέλου ούτως ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να προσεγγίζουν αυτά των παρατηρημένων παροχών η βαθμονόμηση των υδρολογικών μοντέλων μπορεί να χωριστεί σε τρεις κύριες κατηγορίες: την εμπειρική, την αυτόματη και την ημιαυτόματη.

**Η εμπειρική βαθμονόμηση**, δεν αποτελεί μια αυστηρή συστηματική διαδικασία και βασίζεται στην διερεύνηση εναλλακτικών συνδυασμών παραμέτρων που επιλέγει, σύμφωνα με την εμπειρία του ο μελετητής. Αν και η εμπειρική μέθοδος είναι μη αντικειμενική και εξαιρετικά επίπονη, εφαρμόζεται ακόμη διότι η συγκεκριμένη διαδικασία ενσωματώνει την υδρολογική εμπειρία, οδηγώντας έτσι σε τιμές παραμέτρων που είναι πιο ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές των φυσικών χαρακτηριστικών της λεκάνης.

**Η αυτόματη βαθμονόμηση** υιοθετεί μια αντικειμενική συνάρτηση την οποία θεωρεί ως ένα μέτρο καλής προσαρμογής των προσομοιώσεων σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές. Η τελική επιλογή των παραμέτρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, ενώ στα πλεονεκτήματά της συγκαταλέγονται η ευκολία και η αντικειμενικότητα. Κύριο μειονέκτημα της αυτόματης βαθμονόμησης της μεθόδου αποτελεί η πλήρης εξάρτησή της από το μέτρο προσαρμογής που χρησιμοποιείται, τα σφάλματα μετρήσεων που μεταφέρονται από τα δεδομένα και άλλες αβεβαιότητες.

**Η ημιαυτόματη βαθμονόμηση** αποτελεί μια ενδιάμεση διαδικασία, στην οποία ο μελετητής παρακολουθεί την διαδικασία βελτιστοποίησης και επεμβαίνει σε αυτή αυτή, μεταβάλλοντας τα κριτήρια και τις υποθέσεις του προβλήματος, ώστε η πορεία της αναζήτησης να κατευθυνθεί προς την επιθυμητή κατεύθυνση (Μαμάσης, 2009). Συγκεκριμένα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η διαδικασία της βαθμονόμησης, που ακολουθήθηκε στο HEC - HMS , είναι αυτή της εμπειρικής επιλογής των υδρολογικών παραμέτρων.

Ως μέτρο υπολογισμού σφάλματος που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία επιλέχθηκε ο **Συντελεστής Προσδιορισμού Nash-Sutcliffe** (1970) ο οποίος ορίζεται ως εξής:

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

Όπου:

$x_i$  = η παρατηρημένη χρονοσειρά απορροής  
= η μέση τιμή της

$y_i$  = η προσομοιωμένη χρονοσειρά απορροής στο υπό εξέταση χρονικό ορίζοντα ελέγχου

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

Εφόσον  $R = 1$  σημαίνει ότι υπάρχει απόλυτη ταύτιση της παρατηρημένης με την προσομοιωμένη χρονοσειρά.

Εαν  $R < 1$  , σημαίνει ότι η προσαρμογή του μοντέλου είναι πολύ κακή και ότι η προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι χειρότερη εκτιμήτρια σε σχέση με την παρατηρημένη τιμή.

Εαν  $R = 0$  , αυτό υποδεικνύει ότι ο προσομοιωμένη χρονοσειρά είναι τόσο ακριβής όσο και η μέση τιμή των παρατηρημένων τιμών. Είναι εμφανές ότι όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή του συντελεστή  $R$ , τόσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο (Μπαριάμης, 2013).

#### 4.3.1 Πορεία βαθμονόμησης

Μετά την εξαγωγή των πρώτων αποτελεσμάτων για τις αρχικές τιμές των παραμέτρων, ξεκίνησε η βαθμονόμηση των τριών υπολεκανών της υπό μελέτη λεκάνης.

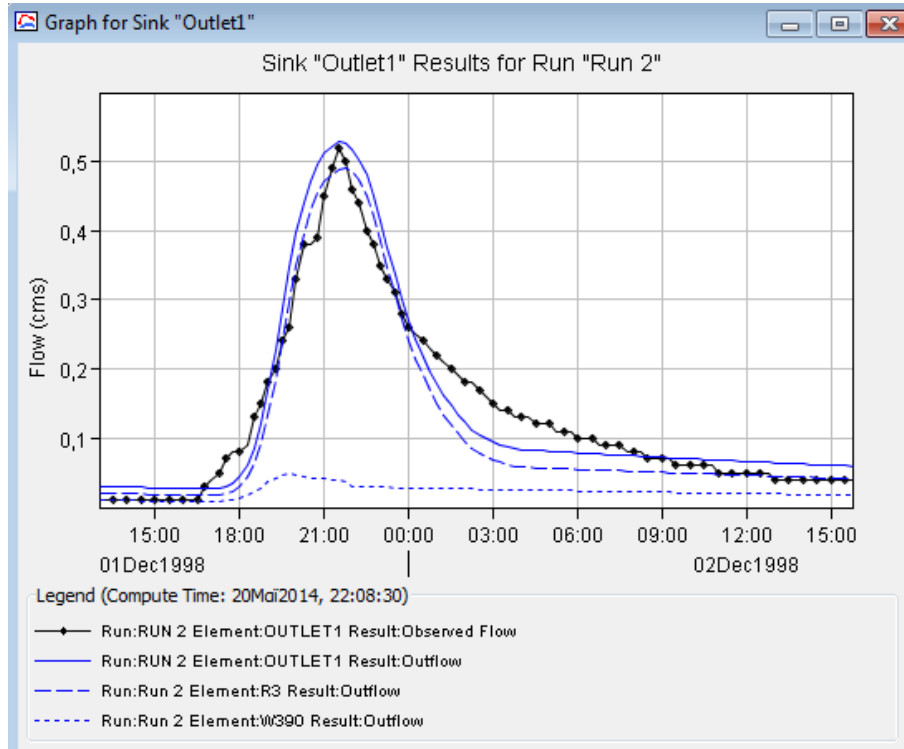
Από τα κριτήρια ελέγχου της βαθμονόμησης θεωρήθηκε πιο αντιπροσωπευτικός για τον τερματισμό της διαδικασίας, ο συντελεστής  $R$  διότι ελέγχει και αξιολογεί το σύνολο των μετρήσεων, το οποίο περιλαμβάνει άμεσα την παροχή αιχμής και έμμεσα τον όγκο.

Οι παράμετροι οι οποίες ρυθμίστηκαν στο παρόν μοντέλο ήταν οι απώλειες (CN, Ia), ο χρόνος υστέρησης της αιχμής (lag time) (τόσο στην κατά SCS όσο και κατά Snyder προσομοίωση) και οι συνιστώσες του υπολογισμού διόδευσης του πλημμυρικού κύματος.

## 4.4 Αποτελέσματα βαθμονόμησης

### 4.4.1 Μέθοδος υπολογισμού μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SNYDER

#### 4.4.2 Επεισόδιο #2 – 01/12/1998

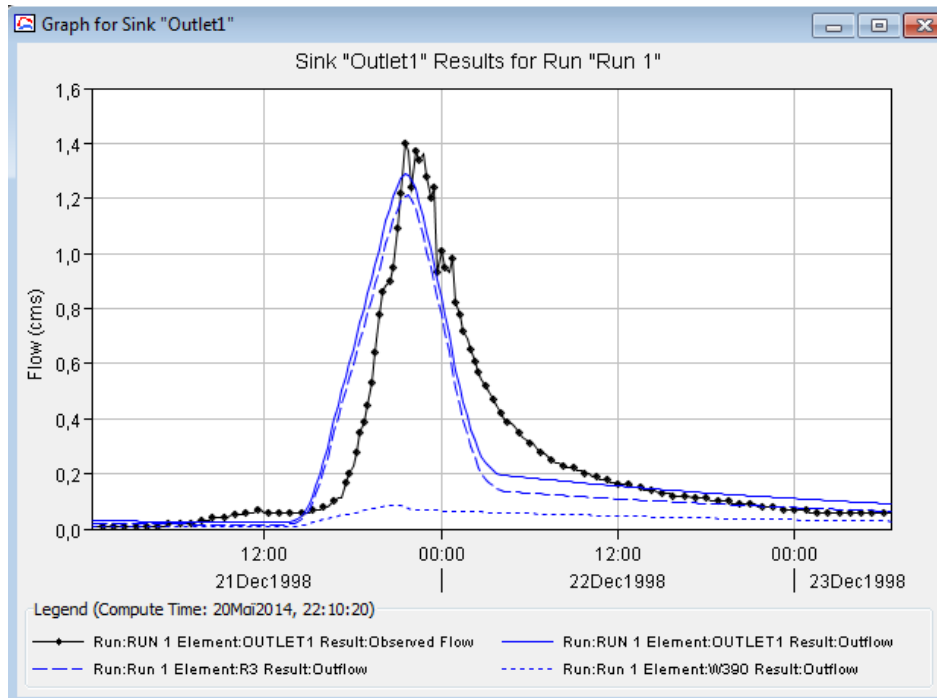


Σχήμα 47: Βαθμονομημένο υδρογράφημα εξόδου για το επεισόδιο #2 (SNYDER)

Πίνακας 15: Αποτελέσματα βαθμονόμησης επεισοδίου #2 κατά SNYDER.

ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 01/12/1998					
SNYDER	ΑΠΩΛΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	ΔΙΟΔΕΥΣΗ Lag Routing	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia (mm)	Lag Time (hr)	ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ	Lag(min)
<b>W620</b>	74	17.92	2.14	R2	1.89
<b>W410</b>	74	17.92	1.69	R1	9.30
<b>W390</b>	74	17.92	0.99	R3	4.41
<b>Σταθμός</b>	Nash				
Outlet(Varetada)	0.81				

### 4.4.3 Επεισόδιο #3 – 21/12/1998



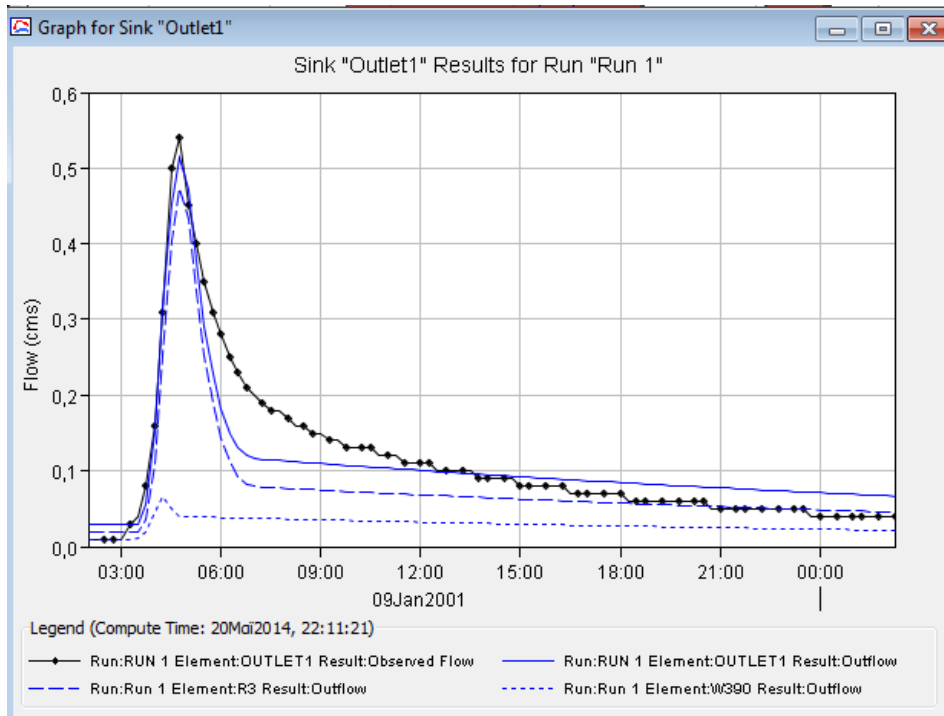
Σχήμα 48: Βαθμονομημένο υδρογράφημα εξόδου για το επεισόδιο #3 (SNYDER)

Πίνακας 16: Αποτελέσματα βαθμονόμησης επεισοδίου #3 κατά SNYDER.

ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 21/12/1998					
SNYDER	ΑΠΩΛΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	ΔΙΟΔΕΥΣΗ Lag Routing	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia (mm)	Lag Time (hr)	ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ	Lag(min)
W620	64	28.69	1.86	R2	1.51
W410	64	28.69	1.47	R1	7.44
W390	64	28.69	0.86	R3	3.53
Σταθμός	Nash				
Outlet(Varetada)	0.77				



#### 4.4.4 Επεισόδιο #4 – 09/01/2001

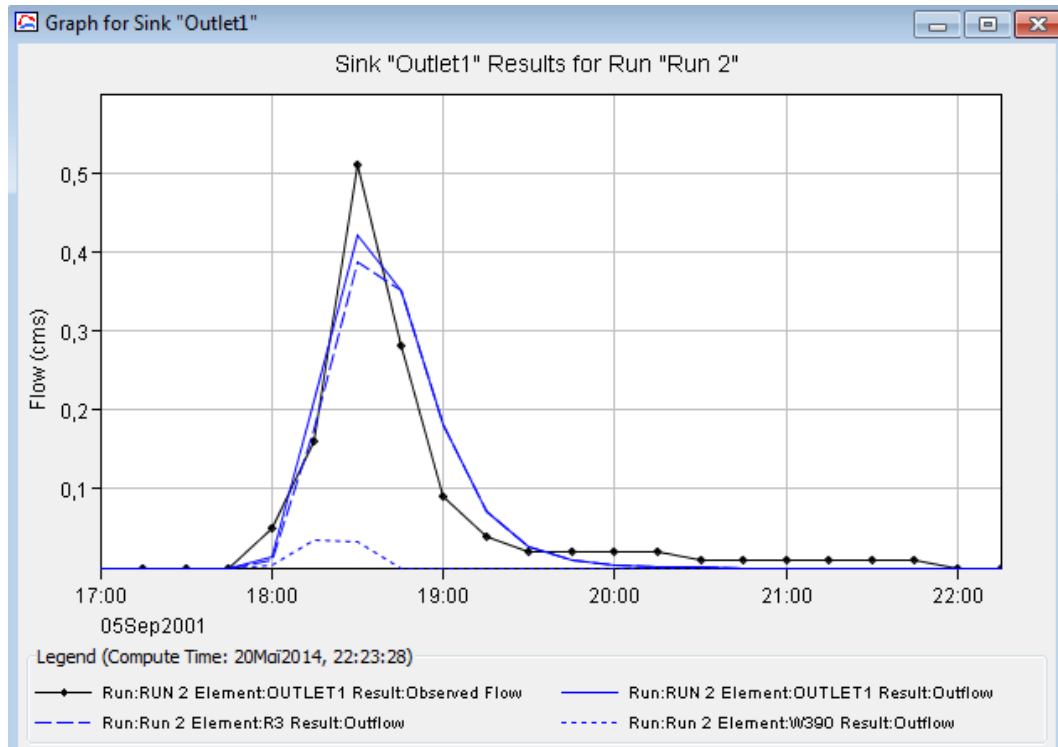


Σχήμα 49: Βαθμονομημένο υδρογράφημα εξόδου για το επεισόδιο #4 (SNYDER)

Πίνακας 17: Αποτελέσματα βαθμονόμησης επεισοδίου #4 κατά SNYDER.

ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 09/01/2001					
SNYDER	ΑΠΩΛΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	ΔΙΟΔΕΥΣΗ Lag Routing	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia (mm)	Lag Time (hr)	ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ	Lag(min)
W620	73	18.65	0.93	R2	1.51
W410	73	18.65	0.74	R1	7.44
W390	73	18.65	0.43	R3	3.53
Σταθμός	Nash				
Outlet(Varetada)	0.657				

#### 4.4.5 Επεισόδιο #5 – 05/09/2001



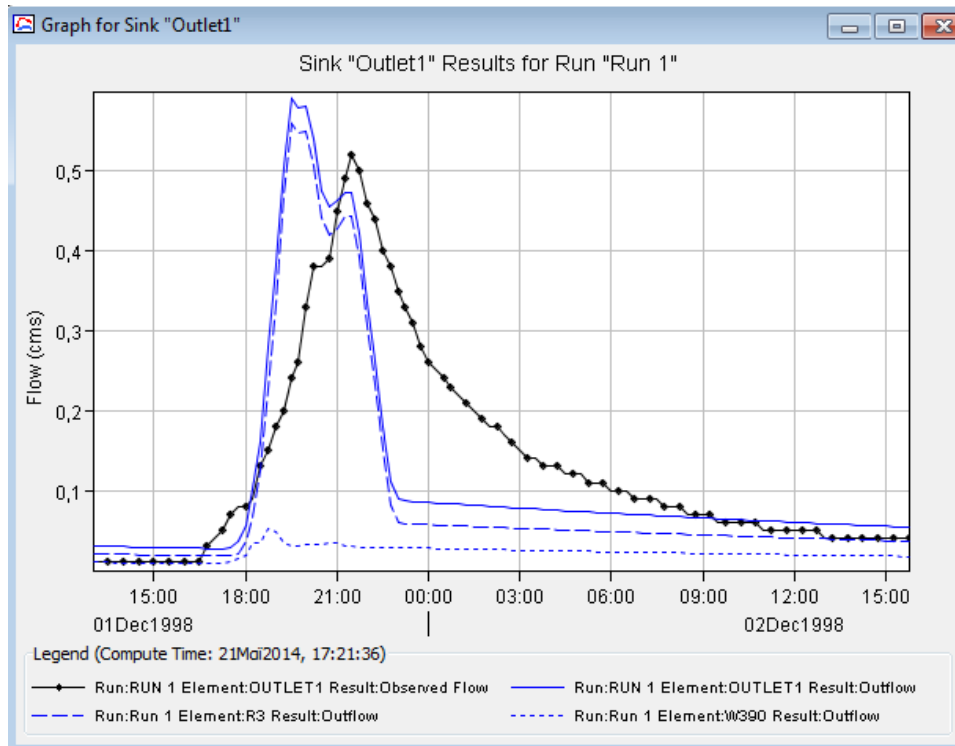
Σχήμα 50: Βαθμονομημένο υδρογράφημα εξόδου για το επεισόδιο #5 (SNYDER).

Πίνακας 18: Αποτελέσματα βαθμονόμησης επεισοδίου #5 κατά SNYDER.

ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 05/09/2001					
SNYDER	ΑΠΩΛΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	ΔΙΟΔΕΥΣΗ Lag Routing	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia (mm)	Lag Time (hr)	ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ	Lag(min)
<b>W620</b>	59	35.07	0.37	R2	1.51
<b>W410</b>	59	35.07	0.29	R1	7.44
<b>W390</b>	59	35.07	0.17	R3	3.53
<b>Σταθμός</b>	Nash				
Outlet(Varetada)	0.88				

### 4.4.6 Μέθοδος υπολογισμού μοναδιαίου υδρογραφήματος κατά SCS

#### 4.4.7 Επεισόδιο #2 – 01/12/1998

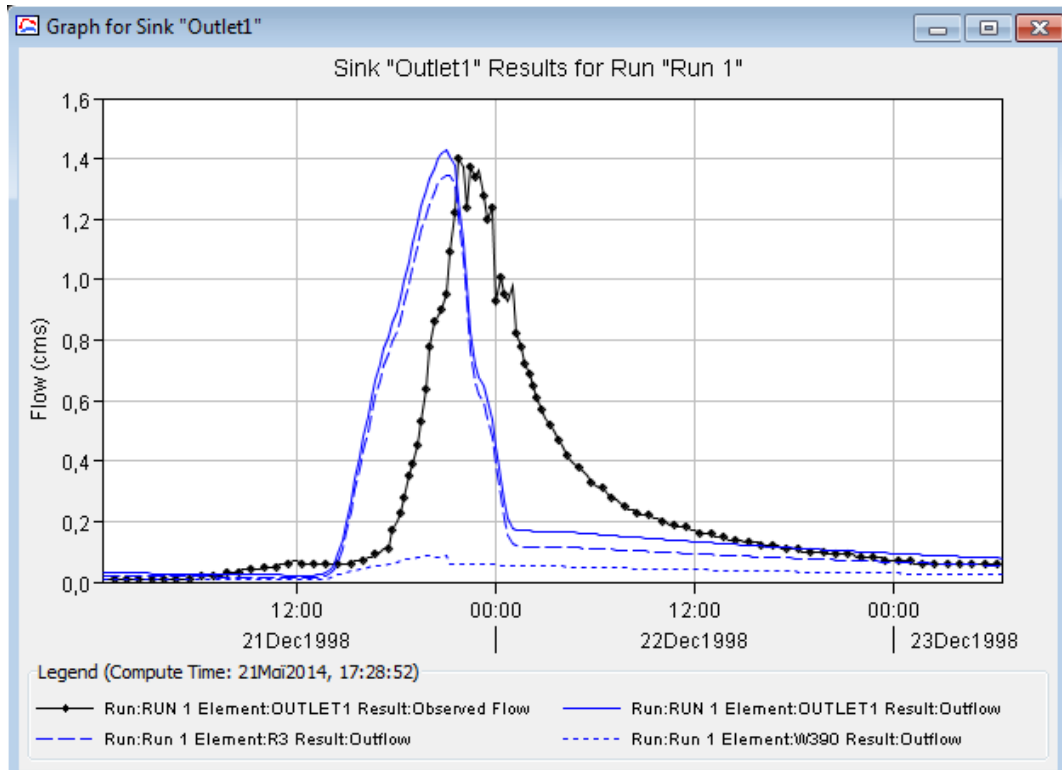


Σχήμα 51: Βαθμονομημένο υδρογράφημα εξόδου για το επεισόδιο #2 (SCS).

Πίνακας 19: Αποτελέσματα βαθμονόμησης επεισοδίου #2 κατά SCS.

ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 01/12/1998					
SCS	ΑΠΩΛΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	ΔΙΟΔΕΥΣΗ Lag Routing	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia (mm)	Lag Time (min)	ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ	Lag(min)
<b>W620</b>	70	21.3	21.48	R2	10.09
<b>W410</b>	70	21.3	18.33	R1	49.59
<b>W390</b>	70	21.3	8.60	R3	23.54
<b>Σταθμός</b>	Nash				
Outlet(Varetada)	0.485				

### 4.4.8 Επεισόδιο #3 – 21/12/1998

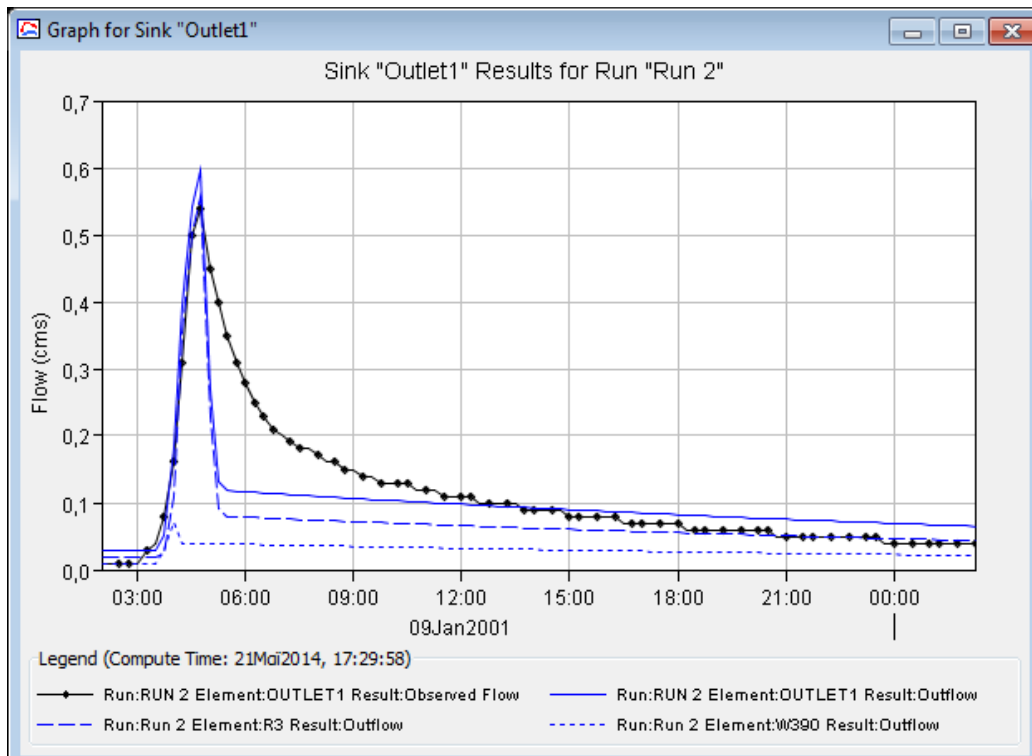


Σχήμα 52: Βαθμονομημένο υδρογράφημα εξόδου για το επεισόδιο #3 (SCS).

Πίνακας 20: Αποτελέσματα βαθμονόμησης επεισοδίου #3 κατά SCS.

ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 21/12/1998					
SCS	ΑΠΩΛΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	ΔΙΟΔΕΥΣΗ Lag Routing	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia (mm)	Lag Time (min)	ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ	Lag(min)
<b>W620</b>	63	29.66	13.96	R2	10.09
<b>W410</b>	63	29.66	11.91	R1	49.59
<b>W390</b>	63	29.66	5.59	R3	23.54
<b>Σταθμός</b>	Nash				
Outlet(Varetada)	0.311				

4.4.9 Επεισόδιο #4 – 09/01/2001

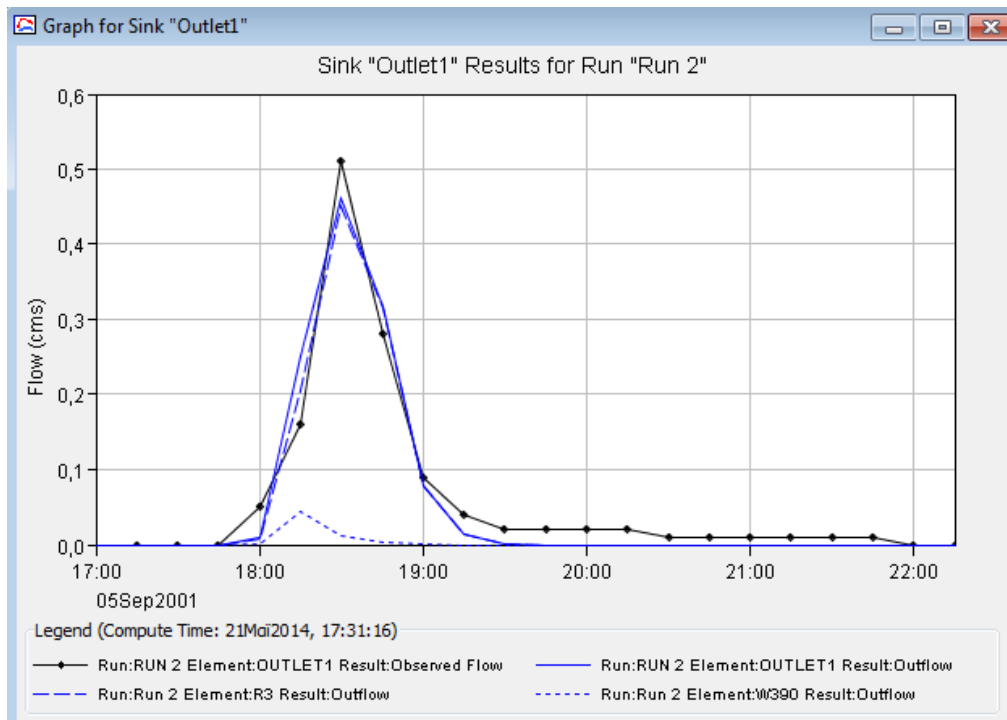


Σχήμα 53: Βαθμονομημένο υδρογράφημα εξόδου για το επεισόδιο #4 (SCS).

Πίνακας 21: Αποτελέσματα βαθμονόμησης επεισοδίου #4 κατά SCS.

ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 09/01/2001					
SCS	ΑΠΩΛΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	ΔΙΟΔΕΥΣΗ Lag Routing	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia (mm)	Lag Time (min)	ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ	Lag(min)
W620	70	21.3	10.74	R2	6.06
W410	70	21.3	9.17	R1	29.75
W390	70	21.3	4.30	R3	14.12
<b>Σταθμός</b>	Nash				
Outlet(Varetada)	0.437				

#### 4.4.10 Επεισόδιο #5 – 05/09/2001



Σχήμα 54: Βαθμονομημένο υδρογράφημα εξόδου για το επεισόδιο #5 (SCS).

Πίνακας 22: Αποτελέσματα βαθμονόμησης επεισοδίου #5 κατά SCS.

SCS	ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 05/09/2001				
	ΑΠΩΛΕΙΕΣ		ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	ΔΙΟΔΕΥΣΗ Lag Routing	
ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	CN	Ia (mm)	Lag Time (min)	ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ	Lag(min)
W620	59	35.92	7.16	R2	3.03
W410	59	35.92	6.11	R1	14.88
W390	59	35.92	2.87	R3	7.06
Σταθμός	Nash				
Outlet(Varetada)	0.97				

#### 4.5 Επαλήθευση μοντέλου

Η διαδικασία της βαθμονόμησης (calibration) ακολουθείται συνήθως από τη διαδικασία της επαλήθευσης (validation).

Η επαλήθευση συνίσταται για να εξακριβωθεί η απόδοση του μοντέλου σε διαφορετικές συνθήκες από αυτές που είχα αρχικά ρυθμιστεί και να διαπιστωθεί αν τελικά αποτελούν αντιπροσωπευτικές αναπαραστάσεις του φυσικού συστήματος που προσομοιώνουν. Συνήθως, η επαλήθευση ενός υδρολογικού μοντέλου γίνεται για το βέλτιστο σύνολο παραμέτρων που έχει προκύψει από τη βαθμονόμηση, ελέγχοντας το ίδιο το κριτήριο προσαρμογής για μια άλλη χρονική περίοδο, για την οποία επίσης

διατίθενται μετρημένες φορτίσεις και αποκρίσεις της λεκάνης. Για να έχει νόημα μια τέτοια προσέγγιση θα πρέπει τα χαρακτηριστικά του συστήματος να έχουν διατηρηθεί αμετάβλητα για το σύνολο της περιόδου ελέγχου του μοντέλου (περίοδος βαθμονόμησης και επαλήθευσης μαζί). Διαφορετικά οι παράμετροι πρέπει να θεωρηθούν διαχρονικά μεταβαλλόμενες, περιορίζοντας δραστικά την επιχειρησιακή χρησιμότητα του υδρολογικού μοντέλου (Μαμάσης, 2009).

Η διαδικασία της επαλήθευσης διενεργείται σε πιο πρόσφατα επεισόδια βάζοντας ως αρχεία εισόδου τους μέσους όρους των παραμέτρων των μοντέλων που βαθμονομήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για κάθε κατηγορία δεδομένων του μοντέλου (Πίνακες 28, 29 και 30). Έπειτα σαν κριτήριο ελέγχου αποτελεσματικότητας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε και σ' αυτό το στάδιο ο συντελεστής προσδιορισμού R.

Η προετοιμασία της επαλήθευσης του μοντέλου περιλαμβάνει τη συλλογή και υπολογισμό του μέσου όρου των βαθμονομημένων παραμέτρων των επεισοδίων #2, #3, #4 και #5 ώστε να αποτελέσουν τα δεδομένα εισόδου για το επεισόδιο επαλήθευσης #1. Στη συνέχεια θα ελεγχθεί η απόδοση του μοντέλου για το επεισόδιο #1.

Πίνακας 23: Μέσος όρος βαθμονομημένων τιμών των απωλειών (SCS).

<b>ΑΠΩΛΕΙΕΣ</b>		
	<b>ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ</b>	
<b>ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ</b>	<b>CN</b>	<b>Ia (mm)</b>
<b>W620</b>	68	25.08
<b>W410</b>	68	25.08
<b>W390</b>	68	25.08

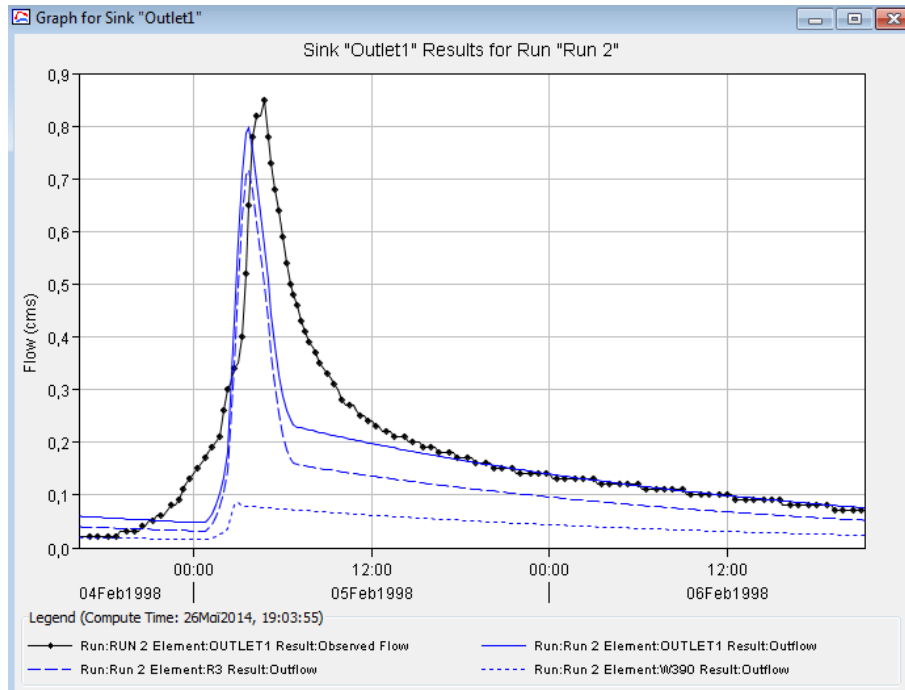
Πίνακας 24: Μέσος όρος βαθμονομημένων τιμών χρόνου υστέρησης (SNYDER).

<b>ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ</b>	
	<b>ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ</b>
<b>ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ</b>	<b>Lag Time (hr)</b>
<b>W620</b>	1.33
<b>W410</b>	1.05
<b>W390</b>	0.61

Πίνακας 25: Μέσος όρος βαθμονομημένων τιμών διόδευσης.

<b>ΔΙΟΔΕΥΣΗ Lag Routing</b>	
	<b>ΜΕΣΟΙ ΟΡΟΙ</b>
<b>ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ</b>	<b>Lag(min)</b>
<b>R2</b>	1.61
<b>R1</b>	7.91
<b>R3</b>	3.75

4.5.1 Αποτελέσματα επαλήθευσης επεισοδίου #1 – 01/02/1998



Σχήμα 55: Υδρογράφημα επαλήθευσης για το επεισόδιο #1, (SNYDER)

Πίνακας 26: Αποτελέσματα επαλήθευσης και ελέγχου αποτελεσματικότητας για το επεισόδιο #1 (SNYDER)

Σταθμός	Τιμές επαλήθευσης	
	Έξοδος	
Επεισόδιο 1	Όγκος (x 1000m <sup>3</sup> )	Αιχμή (m <sup>3</sup> /s)
	29.4	0.8
	Παρατηρημένες τιμές	
	33.99	0.85
Nash=0.645		



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

---

### 5. Σενάριο πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης

5.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά από πυρκαγιά για τη μέθοδο SCS

5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά από πυρκαγιά για τη μέθοδο SNYDER

## 5. Σενάριο πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης.

Ένας από τους λόγους δημιουργίας και κατ' επέκτασης χρήσης των υδρολογικών μοντέλων είναι η πρόβλεψη των επιπτώσεων λόγω αλλαγής χρήσεων γης και ειδικότερα μετά την επίδραση μιας πυρκαγιάς που θεωρείται ένας από τους πιο δραστικούς παράγοντες αλλαγής χρήσεων γης (Beven, 2000).

Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία προσομοίωσης της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης απορροής πριν από εμφάνιση πυρκαγιάς, επόμενο στάδιο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της υδρολογικής απόκρισης της υπό μελέτη λεκάνης μετά από την επίδραση μιας ενδεχόμενης πυρκαγιάς. Στην προκειμένη περίπτωση δημιουργήθηκε ένα σενάριο πυρκαγιάς μέτριας έντασης χωρίς υδρόφοβο έδαφος. Έτσι επαναπροσδιορίστηκαν οι παράμετροι που αντιπροσωπεύουν τις προηγούμενες συνθήκες στη λεκάνη, ούτως ώστε να προσομοιωθεί καλύτερα η υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης μετά την επίδραση της πυρκαγιάς.

Η λεκάνη είναι καθόλα καλυμμένη από σκληροφυλλική δασώδη βλάστηση. Η εμφάνιση λοιπόν μιας δασικής πυρκαγιάς θα καταστρέψει εν μέρει ή και ολοσχερώς, ανάλογα με την ένταση και τη διάρκεια της, το προστατευτικό κάλυμμα της βλάστησης. Με αποτέλεσμα να προκαλέσει μείωση των ποσοτήτων νερού που κατακρατώνται και ανάπτυξη ενός υδρόφοβου εδαφικού στρώματος, σχεδόν αδιαπέρατου με πολύ μικρή διηθητική ικανότητα. Συνεπώς, η απώλεια της φυτοκάλυψης διαφοροποιεί τη διαδικασία της κατακράτησης, η οποία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον υδρολογικό κύκλο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω για κάθε υπολεκάνη αφαιρέθηκε το πρότυπο δεξαμενής κατακράτησης, υπολογίστηκε ένας νέος αριθμός καμπύλης CN και αρχικής κατακράτησης Ia ο οποίος όπως προαναφέρθηκε αντιπροσωπεύει τις συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε υπολεκάνη μετά την επίδραση της πυρκαγιάς.

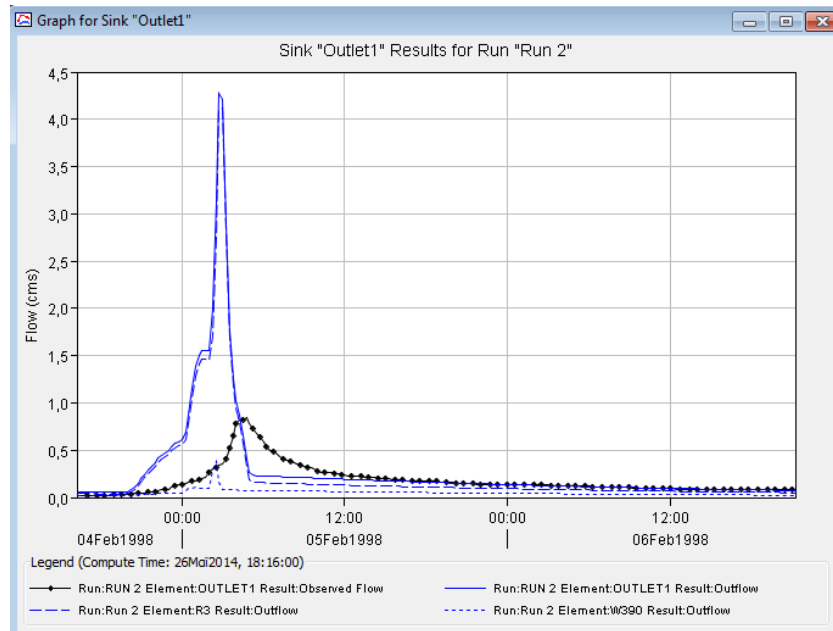
Οι τελικές τιμές των παραμέτρων που εισάγονται στο μοντέλο HEC-HMS :

Πίνακας 27: Τιμές CN και Ia μετά από πυρκαγιά.(Livingston et al. 2005)

Υπολεκάνη	CN	S	Ia/S	Ia
W620	87	37.95	0.20	7.59
W410	87	37.95	0.20	7.59
W390	87	37.95	0.20	7.59

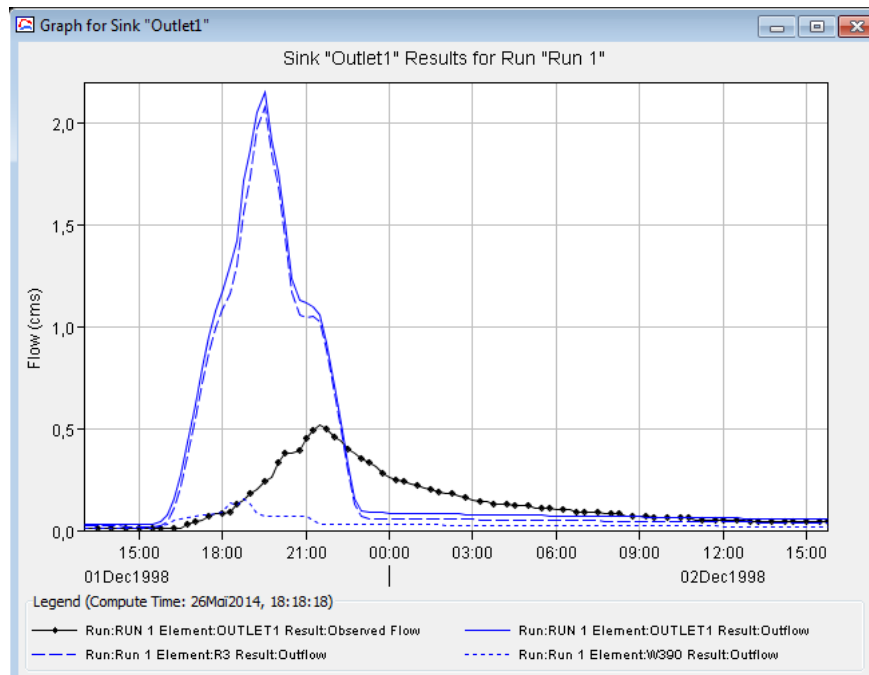
## 5.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά από πυρκαγιά για τη μέθοδο SCS.

### 5.1.1 Επεισόδιο #1-04/02/1998 μετά από πυρκαγιά.



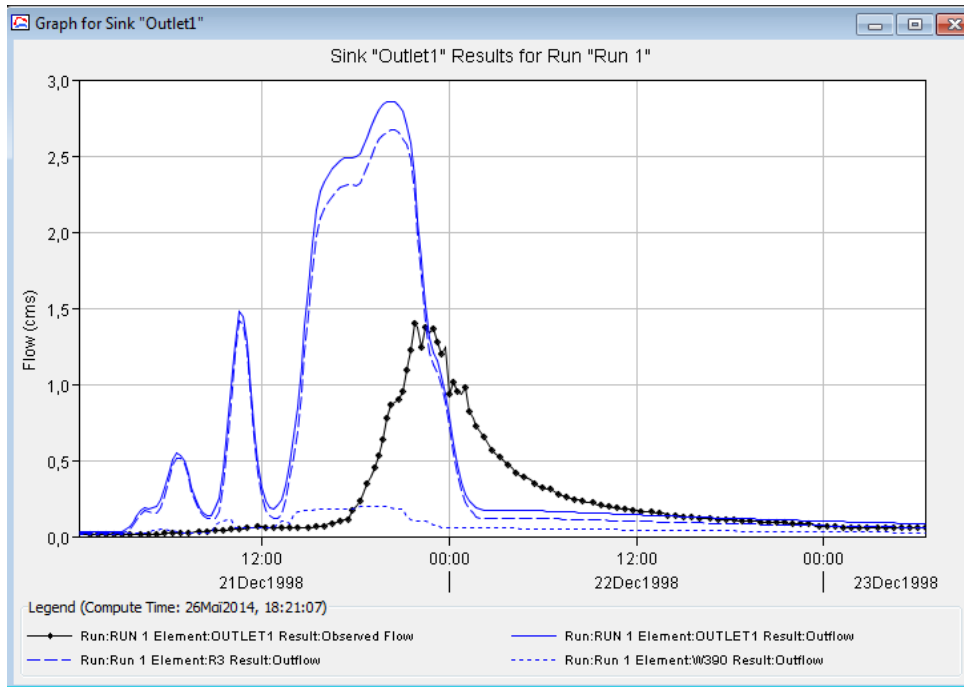
Σχήμα 56: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 1 μετά την πυρκαγιά (SCS).

### 5.1.2 Επεισόδιο #2-01/12/1998 μετά από πυρκαγιά.



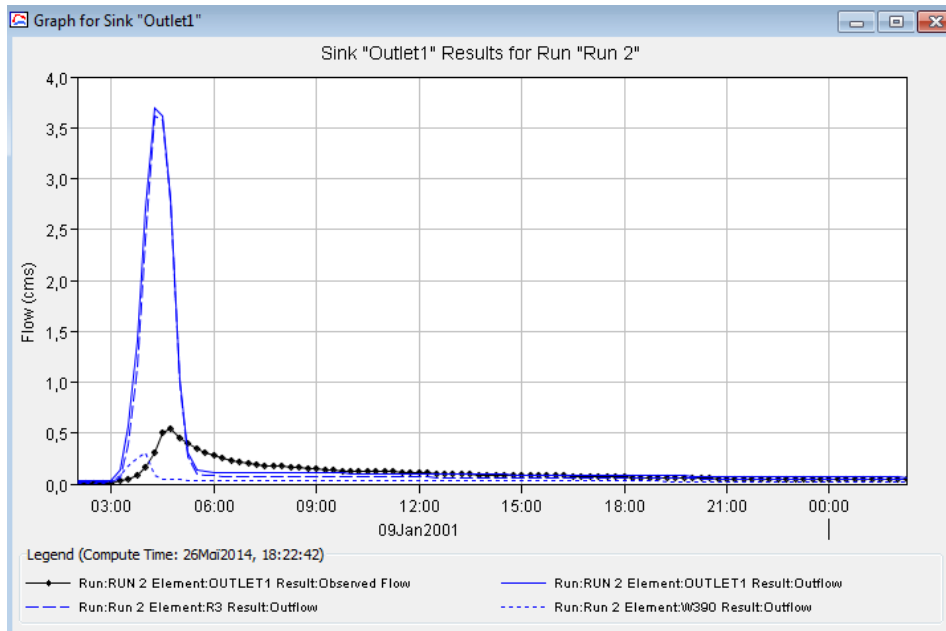
Σχήμα 57: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 3 μετά την πυρκαγιά (SCS).

### 5.1.3 Επεισόδιο #3-21/12/1998 μετά από πυρκαγιά.



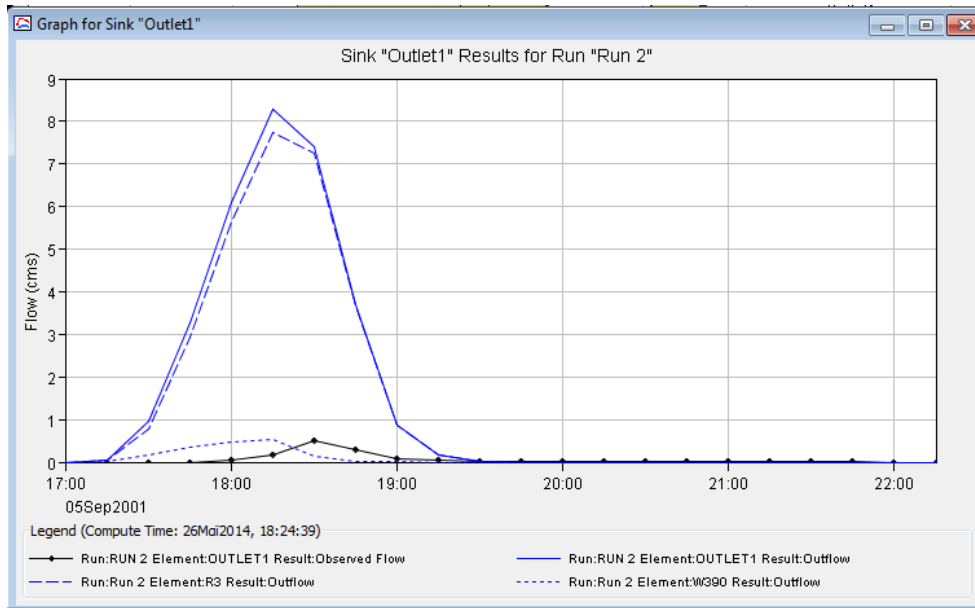
Σχήμα 58: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 3 μετά την πυρκαγιά (SCS).

### 5.1.4 Επεισόδιο #4-09/01/2001 μετά από πυρκαγιά.



Σχήμα 59: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 4 μετά την πυρκαγιά (SCS)..

### 5.1.5 Επεισόδιο #5-05/09/2001 μετά από πυρκαγιά.



Σχήμα 6ο: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 5 μετά την πυρκαγιά (SCS).

### 5.1.6 Παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων μετά από πυρκαγιά με τη μέθοδο SCS.

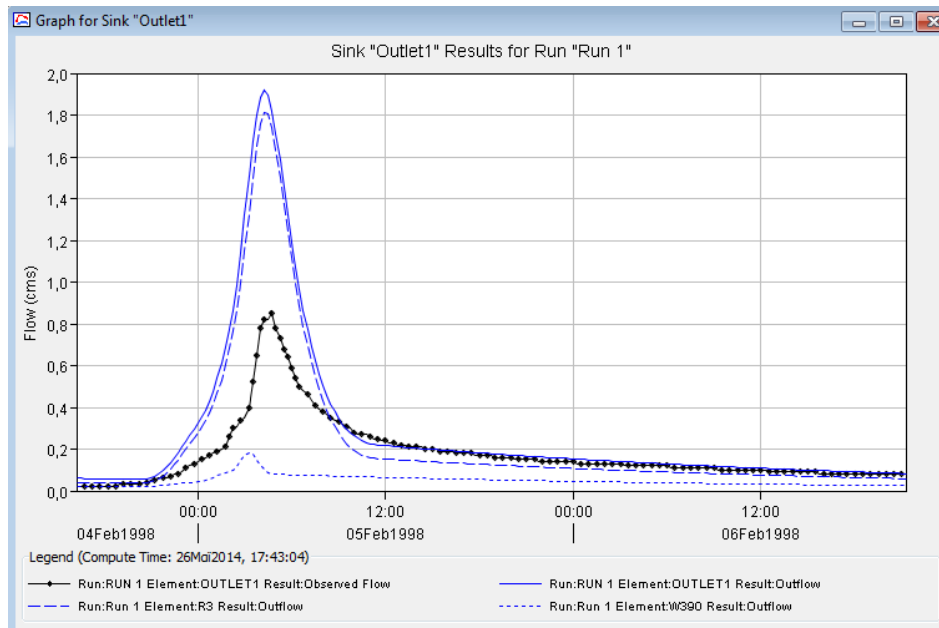
Είναι εμφανές ότι τα υδρογραφήματα μετά την πυρκαγιά έχουν πιο απότομη κλίση και είναι πιο αιχμηρά από ότι πριν λόγω της εμφάνισης απότομης παροχής αιχμής. Παρατηρείται ότι σε όλα τα επεισόδια τόσο η παροχή αιχμής όσο και ο πλημμυρικός όγκος αυξάνονται σημαντικά φτάνοντας σε πολύ υψηλά επίπεδα. Όσον αφορά τον πλημμυρικό όγκο αυξάνεται από 64% έως 138%, ενώ η παροχή αιχμής εμφανίζει αύξηση που ξεκινά από 100% έως 585%. Συγκεκριμένα, για το μόνο θερινό επεισόδιο #5 (05/09/2001) οι τιμές μεγεθύνονται αρκετά με τον πλημμυρικό όγκο να εικοσαπλασιάζεται ενώ η αιχμή να δεκαπλασιάζεται. Αυτό γίνεται διότι το έδαφος είναι περισσότερο ξηρό όποτε σε περίπτωση πυρκαγιάς θα έχουμε σημαντική καταστροφή της βλάστησης, γεγονός που οδηγεί στην παρουσία μεγαλύτερου περισεύματος βροχής και συνεπώς σε πιο έντονα πλημμυρικά φαινόμενα.

Πίνακας 28: Συγκριτικά αποτελέσματα της πλημμυρικής αιχμής και του πλημμυρικού πριν και μετά την πυρκαγιά (SCS).

SCS Σταθμός	Μετά την πυρκαγιά		Πριν την πυρκαγιά	
	Έξοδος		Έξοδος	
Επεισόδιο	Όγκος x 1000m <sup>3</sup>	Αιχμή (m <sup>3</sup> /s)	Όγκος x 1000m <sup>3</sup>	Αιχμή (m <sup>3</sup> /s)
1	55.9	4.3	34.07	0.85
2	31.1	2.1	13.08	0.52
3	109.9	2.9	46.7	1.4
4	21.5	3.7	9.78	0.54
5	27.7	8.3	1.14	0.51

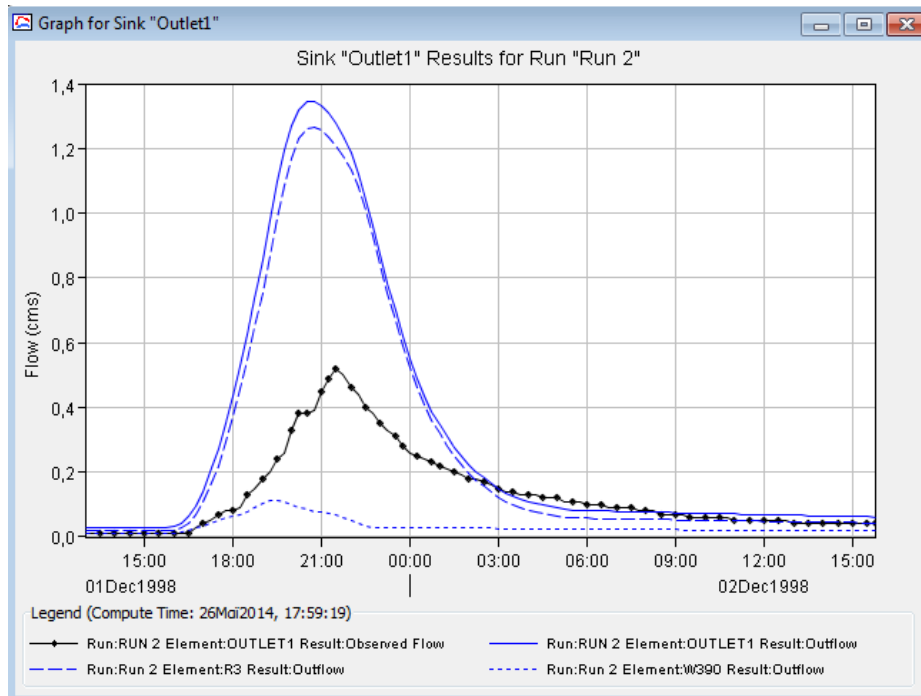
## 5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά από πυρκαγιά για τη μέθοδο SNYDER.

### 5.2.1 Επεισόδιο #1-04/02/1998 μετά από πυρκαγιά.



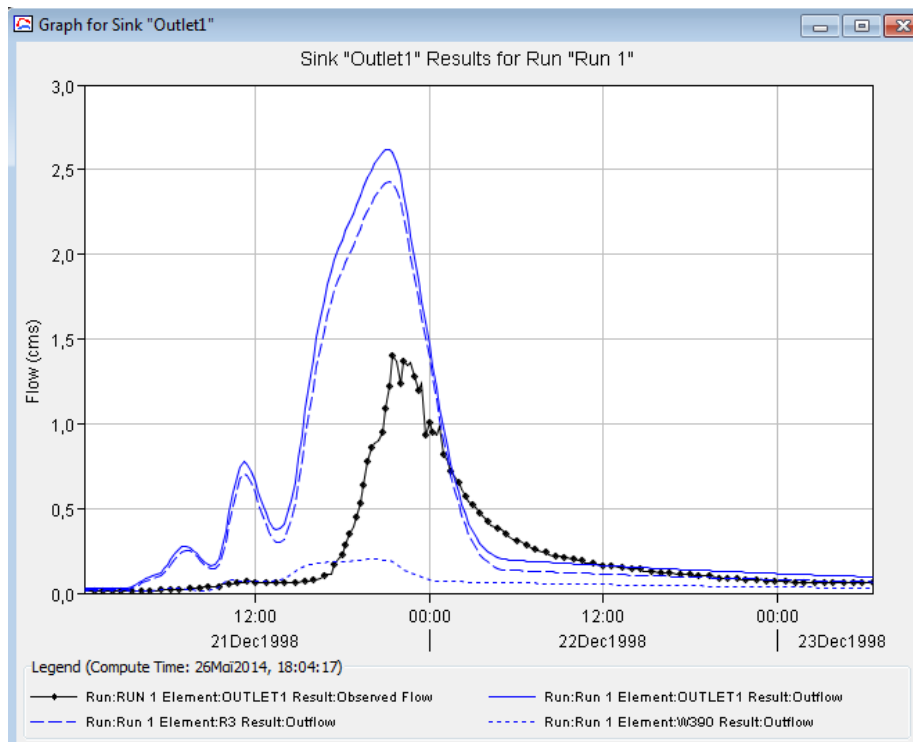
Σχήμα 61: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 1 μετά την πυρκαγιά (SNYDER).

### 5.2.2 Επεισόδιο #2-01/12/1998 μετά από πυρκαγιά.



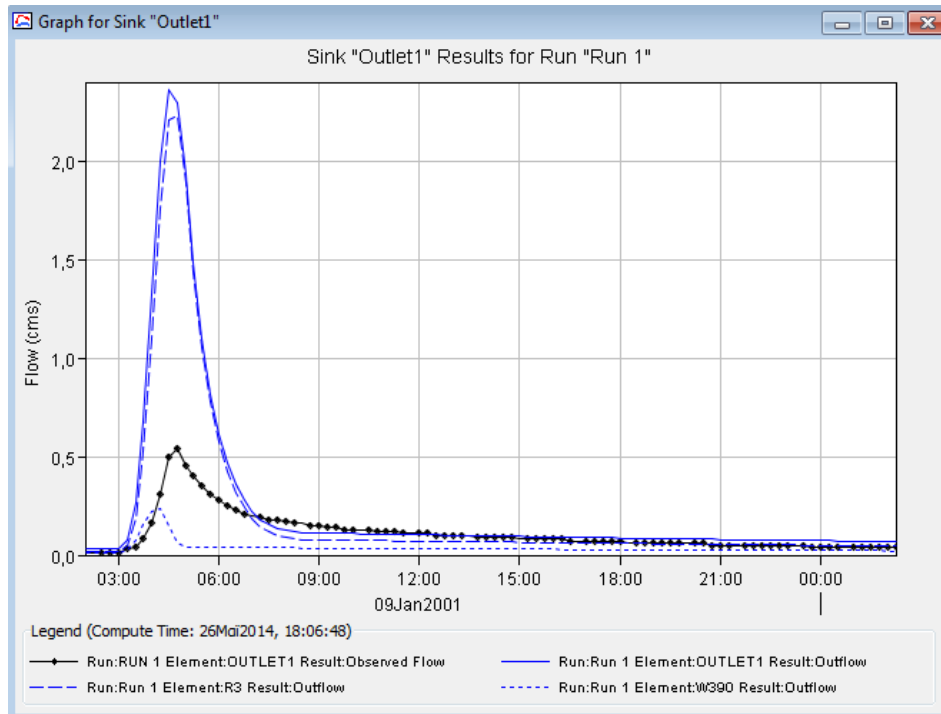
Σχήμα 62: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 2 μετά την πυρκαγιά (SNYDER).

### 5.2.3 Επεισόδιο #3-21/12/1998 μετά από πυρκαγιά.



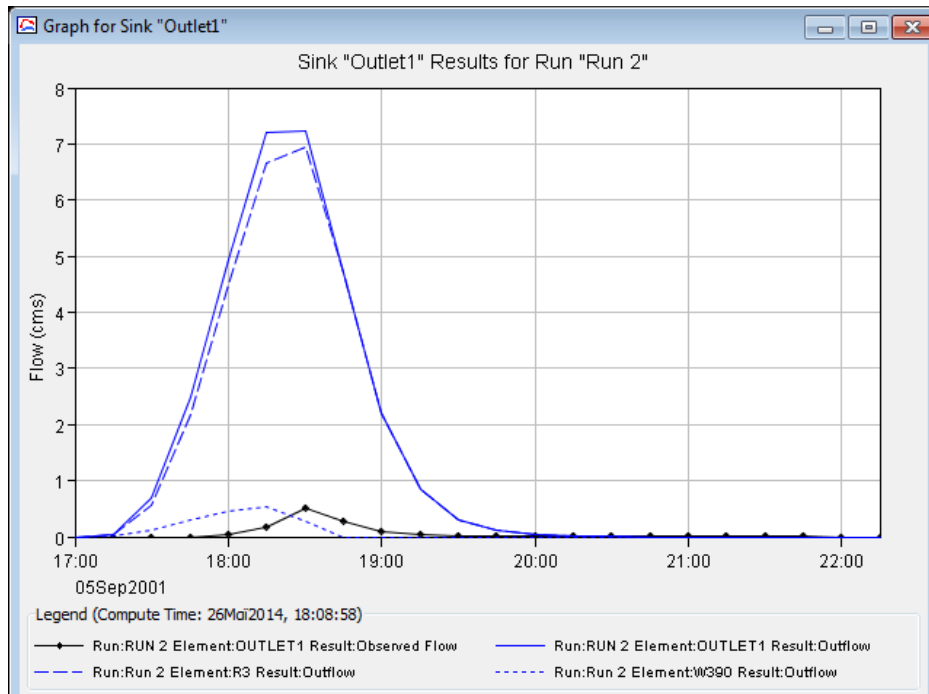
Σχήμα 63: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 3 μετά την πυρκαγιά (SNYDER).

### 5.2.4 Επεισόδιο #4-09/01/2001 μετά από πυρκαγιά.



Σχήμα 64: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 4 μετά την πυρκαγιά (SNYDER).

### 5.2.5 Επεισόδιο #5-05/09/2001 μετά από πυρκαγιά.



Σχήμα 65: Υδρογράφημα για το επεισόδιο # 5 μετά την πυρκαγιά (SNYDER).



### 5.2.6 Παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων μετά από πυρκαγιά με τη μέθοδο SNYDER.

Όπως αναμενόταν τα υδρογραφήματα μετά την πυρκαγιά αποκλίνουν σημαντικά συγκριτικά με αυτά πριν την πυρκαγιά. Είναι εμφανές και σε αυτή τη μέθοδο προσομοίωσης της άμεσης απορροής ότι οι πλημμυρικές αιχμές είναι πολύ πιο έντονες. Σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρείται εμφάνιση και άλλων αιχμών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Παρατηρείται ότι σε όλα τα επεισόδια τόσο η παροχή αιχμής όσο και ο πλημμυρικός όγκος αυξάνονται σημαντικά φτάνοντας σε πολύ υψηλά επίπεδα. Η αύξηση της παροχής αιχμής μετά από μια πυρκαγιά παρουσιάζει αύξηση από 86% έως 345%, ενώ ο όγκος κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με τα αποτελέσματα που έδωσε η μέθοδος SCS και αυξάνεται από 60% έως 130%. Τέλος το επεισόδιο #5 εμφανίζει αυξήσεις άνω του 500%. Τα παραπάνω φανερώνουν την καταλυτική επίδραση των δασικών πυρκαγιών στη συμπεριφορά των υδατορευμάτων, λόγω απώλειας μεγάλου μέρους φυτοκάλυψης της λεκάνης απορροής.

Πίνακας 29: Συγκριτικά αποτελέσματα της πλημμυρικής αιχμής και του πλημμυρικού πριν και μετά την πυρκαγιά (SNYDER).

<b>SNYDER</b>	<b>Μετά την πυρκαγιά</b>		<b>Πριν την πυρκαγιά</b>	
Σταθμός	Έξοδος		Έξοδος	
Επεισόδιο	Όγκος x 1000m <sup>3</sup>	Αιχμή (m <sup>3</sup> /s)	Όγκος x 1000m <sup>3</sup>	Αιχμή (m <sup>3</sup> /s)
1	54.6	1.9	34.07	0.85
2	30.2	1.3	13.08	0.52
3	104.2	2.6	46.7	1.4
4	21.1	2.4	9.78	0.54
5	27.7	7.2	1.14	0.51

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

---

### 6. Συμπεράσματα

#### 6.1 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

## 6. Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία είχε ως στόχο την εκτίμηση της υδρολογικής απόκρισης μιας μικρής ορεινής δασικής πειραματικής λεκάνης, πριν και μετά την επίδραση μιας πυρκαγιάς. Η υδρολογική προσομοίωση της πειραματικής λεκάνης της Βαρετάδας υλοποιήθηκε σε περιβάλλον HEC-HMS. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν η εξαγωγή πλημμυρογραφημάτων στην έξοδο της λεκάνης.

Κρίνεται ιδιαίτερης σημασίας το γεγονός ότι η λεκάνη που επιλέχθηκε προς μελέτη συγκαταλέγεται στις πειραματικές λεκάνες του Ινστιτούτου Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων (ΙΜΔΟ&ΤΔΠ) του πρώην ΕΘΙΑΓΕ και τα αποτελέσματα της θα χρησιμοποιηθούν ως μέτρο σύγκρισης με άλλες μελέτες που έχουν διενεργηθεί στον παρελθόν από υδρολόγους-ερευνητές για την περιοχή.

Αποδείχθηκε ότι το λογισμικό HEC-HMS μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά ακόμα και σε μια τόσο μικρή σε έκταση λεκάνη (1.235 km<sup>2</sup>). Ωστόσο, κατά το στάδιο της προ-επεξεργασίας σε περιβάλλον HEC-GeoHMS, κρίθηκε απαραίτητος ο διαχωρισμός της λεκάνης σε τρεις υπολεκάνες, έτσι ώστε να γίνει καλύτερη προσομοίωση και να εξαχθούν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

Η διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν έγινε εμπειρικά με τη χρήση πινάκων και εξισώσεων από την εγχώρια και διεθνή βιβλιογραφία.

Όπως αναμενόταν τα αποτελέσματα της πρώτης προσομοίωσης τόσο με τη μέθοδο SCS όσο και με τη μέθοδο SNYDER για τις αρχικές εκτιμήσεις των παραμέτρων αποκλίνουν αρκετά από τις παρατηρημένες μετρήσεις της παροχής τόσο ως προς τους συνολικούς όγκους που παρατηρούνται όσο και στις αιχμές. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την προσομοίωση με τη μέθοδο SNYDER εμφανίστηκε χρονική υστέρηση της αιχμής σε δύο από τα τέσσερα επεισόδια που προσομοιώθηκαν.

Ακολούθησε η βαθμονόμηση του μοντέλου, που αναδείχθηκε σε μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία. Κύριος παράγοντας παραμετροποίησης του μοντέλου ήταν ο καθορισμός των απωλειών, καθώς σύμφωνα με τις πρώτες εκτιμήσεις που έγιναν υπερεκτιμούνταν η απορροή. Ως αποτέλεσμα της βαθμονόμησης συμπεραίνεται ότι η μέθοδος SCS δεν μπορεί να προσομοιώσει ικανοποιητικά τα γεγονότα βροχής που επιλέχθηκαν τόσο ως προς την εκτίμηση των πλημμυρικών όγκων όσο και των πλημμυρικών αιχμών. Αυτό γίνεται εμφανές και από τα αποτελέσματα που έδωσε ο συντελεστής προσδιορισμού R καθώς κυμαινόταν από -0,503 έως 0,485, με εξαίρεση το τελευταίο επεισόδιο όπου ο R πήρε την τιμή 0,97. Αντίθετα, η μέθοδος SNYDER προσομοιώνει ικανοποιητικά τα επεισόδια τόσο στις αιχμές όσο και στους όγκους. Κάτι το οποίο γίνεται εμφανές από τις τιμές του συντελεστή R για τη μέθοδο

αυτή, καθώς πήρε τιμές από 0,657 έως 0,88. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί μόνο αυτή στο στάδιο της επαλήθευσης. Όσον αφορά τη μέθοδο SCS απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση. Στο επεισόδιο 04/02/1998 παρατηρήθηκε βελτίωση των αποτελεσμάτων τόσο ως προς της παροχής αιχμής όσο και του όγκου απορροής. Η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού  $R = 0,635$  και είναι ενδεικτική της καλύτερης προσέγγισης που είχε το μοντέλο.

Τέλος, επιχειρήθηκε προσομοίωση των επεισοδίων για συνθήκες που επικρατούν μετά από μια πυρκαγιά. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τόσο για τη μέθοδο SCS όσο και για τη μέθοδο SNYDER καταδεικνύουν την καταστροφική επίδραση των πυρκαγιών στις λεκάνες απορροής των υδατορευμάτων. Η εμφάνιση μιας πυρκαγιάς καταστρέφει τη φυτοκάλυψη και συμβάλλει στη διάβρωση και τη δημιουργία υδροφοβικού στρώματος με αποτέλεσμα την εμφάνιση οξύτερων πλημμυρικών φαινομένων. Η απώλεια της βλάστησης, η οποία αποτελεί το πρώτο εμπόδιο που συγκρατεί μέρος του νερού των κατακρημνισμάτων οδηγεί στην ταχύτερη και συνάμα πιο έντονη ροή του νερού προς τα κατάντη. Όπως αναμενόταν μετά την πυρκαγιά τόσο η αιχμή όσο και ο όγκος αυξήθηκαν σημαντικά.

### **6.1. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

- Ανάπτυξη της συγκεκριμένης μεθοδολογίας στις υπόλοιπες πειραματικές λεκάνες του ΙΜΔΟ&ΤΔΠ, για τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων και σε άλλες μορφές δασικής βλάστησης (κωνοφόρα, φυλλοβόλα πλατύφυλλα).
- Σύγκριση των αποτελεσμάτων με παλαιότερες μελέτες, ούτως ώστε να αναδειχθεί η μέθοδος που εξάγει πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την προσομοίωση της λεκάνης.
- Χρήση του λογισμικού HEC-RAS με σκοπό να υπολογιστεί ο όγκος των φερτών υλικών τα οποία αντιπροσωπεύουν ένα μέρος των απορροών και παροχών των μεγάλων περιστατικών βροχής.
- Μέσω του HEC-HMS δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει διάφορα πρότυπα για τον υπολογισμό των απωλειών, της άμεσης απορροής, της βασικής απορροής, της διόδευσης, της εδαφικής επιφάνειας κ.α. Η περαιτέρω διερεύνηση και η εφαρμογή αυτών τόσο σε επίπεδο μεμονωμένου επεισοδίου βροχής όσο και σε συνεχή προσομοίωση ενός υδρολογικού έτους, θα εξάγουν αξιόλογα αποτελέσματα για έρευνα.

## Βιβλιογραφία

### Ξένη βιβλιογραφία

Anderson, H. W., Hoover, M. D. & Reinhart, K. G., 1976. *Forests and water: effects of forest management on floods, sedimentation and water supply..* Berkeley,CA: USDA For. Serv. Rep., Gen. Tech. Rep., PSW- 18.

Beven, K. J., 2000. *Rainfall-runoff modeling - The primer.* Chichester: John Wiley and Sons, LTD,.

Bosch, J. M. & Hewlett, J. D., 1982. A rewire of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration.. *Journal of Hydrology*, Issue 55, pp. 3-23.

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. US Department of Agriculture, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. Forest Service Research Paper RM -191: 12.

DeBano, L. F., Daniel, G. L. & Ffolliot , P. F., 1998. *Fire's Effects on Ecosystems.* s.l.:John Wiley & Sons.

Donat, M., 1995. *Bioengineering Techniques for Streambank Restoration, a Review of Central European Practices.* s.l.

Inbar, M., Tamir, M. & Wittenberg, L., 1998. Runoff and erosion process after a forest fire in Mount Carmel, a Mediterranean area. *Geomorphology*, Issue 24, pp. 17-33.

Livingston, Russell, K. & Earles, T., 2005. Los Alamos post-fire watershed recovery: a curve-number-based evaluation.. *American Society of Civil Engineers*, pp. 471-481.

Mc Kenzie, D., Gedalof, Z., Peterson, D. & Mote, P., 2004. Climatic change, wildfire, and conservation. *Conservation Biology*, pp. 890-902.

Merwade, V., 2012. *Hydrologic Modeling using HEC-HMS*, School of Civil Engineering, Purdue University.

Nasseri, I., 1988. *Frequency of floods from a burned chaparral watershed.* In: *Proceeding of the symposium on fire and watershed management.*, Berkeley, California: USDA (Forest Service).

Papanikolaou, D., Diakakis, M. & Aggelopoulos, A., 2009. Geoenvironmental impact after the 2009 wildfires in Northeastern Attica, Greece. Proceedings of Forest Fires in East Attica, Policies and Remediation Measures Meeting,. *Geotechnical Chamber of Greece.*

Rulli, M.C., Rosso, R., 2005. Modeling catchment erosion after wildfires in the Saint Gabriel Mountains of southern California. *Geophysical Research Letters* 32, L19401, doi: 10.1029/ 2005GL023635.

Rulli, M.C., Bozzi, S., Spada, M., Bocchiola, D., Rosso, R., 2006. Rainfall simulations on a fire disturbed Mediterranean area. *J Hydrol*, 327(3-4): 323-38.

Rulli, M.C., Rosso, R., 2007. Hydrologic response of upland catchments to wildfires. *Advances in Water Resources* 30: 2072-2086.

Westerling, A. et al., 2003. Climate and Wildfire in the Western United States. *Bulleting of the American Meteorological Society*, Issue 5, pp. 595-604

Xanthopoulos, G., 2003. Factors affecting the vulnerability of houses to wildland fire in the Mediterranean region. *Proceedings of the International Workshop on "Forest Fires In the wildland – Urban interface and Rural Areas in Europe: An integral planning and challenge"*, Athens.

### **Ελληνική βιβλιογραφία**

Αλωνιστιώτη, Δ., 2011. *Διερεύνηση της επίδρασης των δασικών πυρκαγιών στην υδρολογική απόκριση λεκανών απορροής της ανατολικής Αττικής*, Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσιών Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακή εργασία. Αθήνα.

Γκόφας, Α., 2001. *Εγχειρίδιο Δασοπροστασίας*. Θεσσαλονίκη: Γιαχούδη-Γιαπούλη.

Κασσελά, Α., 2011. Υδρολογική προσομοίωση της διευρημένης πειραματικής λεκάνης της Ανατολικής Αττικής: ρέματα Ραφήνας και Λυκορέματος, με χρήση του μοντέλου HEC – HMS, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείου, Διπλωματική εργασία, Αθήνα.

Κωτούλας, Δ., 2001. *Ορεινή Υδρονομική ( Μέθοδοι και συστήματα υδρογεωνομικής διευθέτησης)*. Θεσσαλονίκη: Τμήμα εκδόσεων Α.Π.Θ..

Μαμάσης, Ν., 2009. *Υδρολογικά μοντέλα και εφαρμογές, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις*. Αθήνα: Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων.

Μαμάσης, Ν., 2012. Φυσικό και πιθανοτικό πλαίσιο πλημμυρών. Πρόληψη και μετριασμός των επιπτώσεων τους. Στο: *Παραδόσεις στα πλαίσια του μαθήματος: Υδατικό Περιβάλλον και Ανάπτυξη*. s.l.

Μάρης, Φ., 2013. Διαλέξεις του μαθήματος «Φυτοτεχνικές διευθετήσεις», Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ορεστιάδα. [Ηλεκτρονικό] Available at: [https://eclass.duth.gr/eclass/modules/document/file.php/OPEN2164/ΦΥΤΟΤΕΧΝΙΚΕΣ%20ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΕΙΣ\\_1.pdf](https://eclass.duth.gr/eclass/modules/document/file.php/OPEN2164/ΦΥΤΟΤΕΧΝΙΚΕΣ%20ΔΙΕΥΘΕΤΗΣΕΙΣ_1.pdf) [Πρόσβαση 18 Μάιος 2014].

Μιμίκου, Μ., 2006. *Τεχνολογία Υδατικών Πόρων*. 3η Έκδοση επιμ. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Μιμίκου, Μ. & Μπαλτάς, Ε., 2006. *Τεχνική Υδρολογία*. 4η Έκδοση επιμ. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Μπαλούτσος, Γ., Οικονόμου, Α. & Καούκης, Κ., 2001. *Ο κίνδυνος της πλημμύρας σε λεκάνες απορροής μετά από πυρκαγιά. Ανάλυση του προβλήματος και άμεσα μέτρα μείωσης των επιπτώσεων*. Αθήνα, Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας.

Μπαριάμης, Γ., 2013. *Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του υδρολογικού μοντέλου *hes - hms* και εφαρμογή στη λεκάνη του ρέματος Ραφήνας*. Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσιών Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακή Εργασία. Αθήνα.

Μπέλλος, Κ., 2006. *Στοιχεία Τεχνικής Υδρολογίας*, Ξάνθη: Εταιρεία Αξιοποίησης και Διαχείρισης της Περιουσίας του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

Μπουρλέτσικας, Α., 2004. *Μελέτη και διερεύνηση της σχέσης βροχής - πλημμυρικής απορροής σε μια μικρή πειραματική ορεινή δασική υδρολογική λεκάνη της Δυτικής Στερέας Ελλάδος*, Μεταπτυχιακή Εργασία. Αθήνα.

Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για τη Θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων, 22 Δεκεμβρίου 2000. Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L327/1.

Οδηγία 2007/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την, Αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, 6 Νοεμβρίου 2007, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων L 288/27.

Παγάνα, Β., 2012. *Κατάρτιση χαρτών πλημμύρας στην περιοχή της Ραφήνας*, Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Υδατικών Πόρων Υδραυλικών και Θαλασσιών Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μεταπτυχιακή Εργασία. Αθήνα.

Παυλίδης, Θ., 2007. *Ορεινή Υδρονομική II (Διευθετήσεις Ορεινών Υδάτων), Μέρος II, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις*. Θεσσαλονίκη: Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ.

Στάμου, Λ., Σκοπελίτη, Α., 2009. Παρουσίαση στο μάθημα *Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στους Υδατικούς Πόρους*, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τσακίρης, Γ., 1995. *Υδατικοί Πόροι: I. Τεχνική Υδρολογία*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

Υπ.Α.Α.Τ, 2006. Τα Φράγματα και οι Λιμνοδεξαμενές του Υπουργείου Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων Β' Έκδοση – Νέα Έργα . Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, Ειδική Γραμματεία Γ' ΚΠΣ. Υπ.Α.Α.Τ. 2006. [Ηλεκτρονικό] Available at: [http://www.ekke.gr/estia/gr\\_pages/gr\\_index.htm](http://www.ekke.gr/estia/gr_pages/gr_index.htm), [Πρόσβαση: 14 Μαΐος 2014]