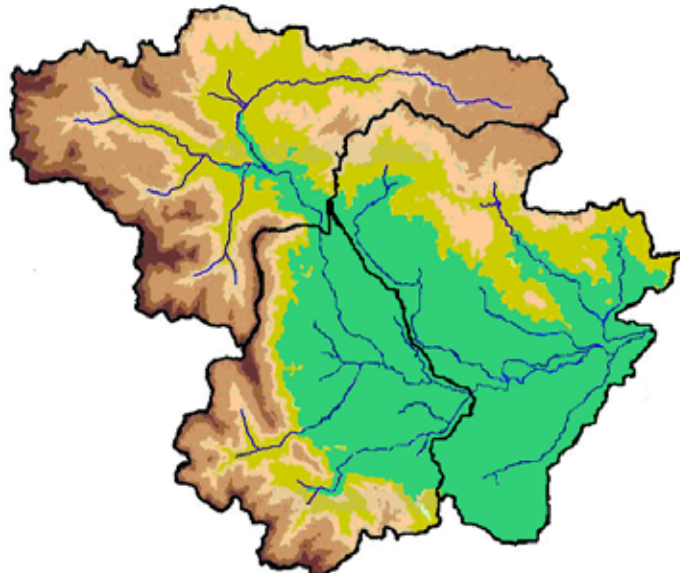




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ
ΠΗΝΕΙΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC – HMS



ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ : ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Κ. ΚΑΨΑΛΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ : ΜΙΜΙΚΟΥ ΜΑΡΙΑ (ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.)

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2009

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΝΤΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ
ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC – HMS»

Προπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Παναγιώτης Κ. Καψάλης

Αθήνα, Μάρτιος 2009

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Προσομοίωση της ανάντη λεκάνης του ποταμού Πηνειού και ανάλυση ευαισθησίας με χρήση του υδρολογικού μοντέλου HEC – HMS» μου ανατέθηκε στα πλαίσια των προπτυχιακών σπουδών της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος. Θα ήθελα εδώ να ευχαριστήσω ξεχωριστά:

➤ την κα Μ.Α Μιμίκου, καθηγήτρια και πρόεδρο της σχολής Πολιτικών Μηχανικών για την ανάθεση του θέματος, την επίβλεψη και την άριστη συνεργασία μας,

➤ την κα Σαφιολέα Ρία, ερευνήτρια του εργαστηρίου υδρολογίας και αξιοποίησης υδατικών πόρων, για την γενικότερη καθοδήγηση, την επίβλεψη και τον συμβουλευτικό χαρακτήρα της άψογης συνεργασίας μας καθώς και για την πολύτιμη βοήθειά της στην χρήση του προγράμματος ArcView GIS,

➤ όλους όσους συνέβαλαν, με διαφορετικό τρόπο ο καθένας, στην πραγματοποίηση της παρούσης εργασίας.

Παναγιώτης Κ. Καψάλης
Αθήνα, Μάρτιος 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	I
Περιεχόμενα.....	II
Ευρετήριο Εικόνων.....	VII
Ευρετήριο Πινάκων.....	IX
Ευρετήριο Διαγραμμάτων.....	XI
Περίληψη.....	XV

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο :

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Ο υδρολογικός κύκλος.....	1
1.2 Το υδατικό ισοζύγιο.....	3
1.3 Οι υδατικοί πόροι της χώρας μας.....	3
1.4 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	5
1.5 Δομή της εργασίας.....	6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο :

ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.....	8
2.1 Περιγραφή υδατικού διαμερίσματος.....	8
2.2 Γεωμορφολογικά – γεωλογικά χαρακτηριστικά.....	9
2.3 Κλίμα.....	10
2.4 Υδατικοί πόροι.....	13
2.4.1 Επιφανειακοί υδατικοί πόροι.....	13
2.4.2 Υπόγεια νερά.....	16
2.4.3 Ποιοτικά χαρακτηριστικά υδάτων.....	19
2.5 Συνοπτική αναφορά προβλημάτων.....	21
2.5.1 Επιφανειακά νερά.....	22
2.5.2 Υπόγεια νερά.....	23
2.6 Περιγραφή περιοχής μελέτης.....	23

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο :**ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ – Σ.Γ.Π – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ**

HEC – HMS.....	26
3.1 Ταξινόμηση υδρολογικών μοντέλων.....	26
3.1.1 Πεδίο εφαρμογής.....	26
3.1.2 Μαθηματική δομή.....	27
3.1.3 Χρονική διακριτότητα.....	29
3.2 Τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών.....	29
3.2.1 Arcview.....	30
3.2.2 HEC – GeoHMS.....	30
3.2.3 Spatial analyst.....	31
3.3 Περιγραφή υδρολογικού μοντέλου HEC – HMS.....	33
3.3.1 Φυσική περιγραφή της λεκάνης απορροής.....	35
3.3.1.1 Υδρολογικές απώλειες.....	36
3.3.1.2 Άμεση απορροή.....	36
3.3.1.3 Βασική απορροή.....	37
3.3.1.4 Διόδευση.....	37
3.3.2 Περιγραφή μετεωρολογικού μοντέλου.....	38
3.3.2.1 Βροχόπτωση.....	38
3.3.2.2 Δυνητική εξατμισοδιαπνοή – χιονόπτωση.....	38
3.3.3 Υδρολογική προσομοίωση.....	38
3.3.4 Καθορισμός παραμέτρων.....	39
3.3.5 Επαλήθευση.....	40
3.3.6 Στάδια μοντελοποίησης.....	40
3.3.7 Εγχειρίδια HEC – HMS - Πηγές.....	41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο :**ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ**

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ.....	42
4.1 Μέθοδοι μέτρησης βροχής.....	42
4.1.1 Βροχόμετρα.....	42
4.1.2 Βροχογράφοι.....	43

4.1.3	Μετεωρολογικό ραντάρ.....	45
4.1.4	Εγκατάσταση βροχομέτρων και βροχογράφων.....	46
4.2	Μέθοδοι μέτρησης στάθμης.....	46
4.3	Επιλογή σταθμών – πλημμυρικών επεισοδίων.....	48
4.4	Βροχομετρικά δεδομένα.....	51
4.4.1	Κατανομή σημειακών βροχοπτώσεων.....	55
4.5	Δεδομένα παροχής – Καμπύλη στάθμης – παροχής.....	56
4.6	Μαθηματικά πρότυπα – παράμετροι.....	59
4.6.1	Απώλειες βροχής – Πρότυπο αριθμού καμπύλης (SCS Curve Number).....	60
4.6.1.1	Εκτίμηση παραμέτρων.....	62
4.6.2	Βασική απορροή – Πρότυπο εκθετικής μείωσης (Exponential Recession).....	64
4.6.2.1	Εκτίμηση παραμέτρων.....	66
4.6.3	Άμεση απορροή – Συνθετικό Μοναδιαίο Υδρογράφημα Snyder (Snyder Unit Hydrograph).....	67
4.6.3.1	Βασικές αρχές στη θεωρία μοναδιαίου υδρογραφήματος...	68
4.6.3.2	Εκτίμηση παραμέτρων.....	70
4.6.4	Διόδευση πλημμύρας – Muskingum.....	71
4.6.4.1	Εκτίμηση παραμέτρων.....	73
4.7	Βαθμονόμηση.....	75
4.7.1	Γενικά – Τεχνικές.....	75
4.7.2	Αλγόριθμος Univariate Gradient.....	78
4.7.3	Αντικειμενική συνάρτηση ‘Άθροισμα τετραγώνων των διαφορών’..	79
4.7.4	Στατιστικοί δείκτες.....	80
4.8	Επαλήθευση.....	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο :

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC – HMS ΓΙΑ ΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ

ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ.....	82
5.1 Γενικά.....	82
5.2 Εισαγωγή πρωτογενών δεδομένων.....	83

5.3 Εκτίμηση παραμέτρων.....	83
5.3.1 Παράμετροι μοναδιαίου υδρογραφήματος Snyder.....	84
5.3.2 Παράμετροι αριθμού καμπύλης CN κατά SCS.....	85
5.3.3 Παράμετροι προτύπου διόδευσης Muskingum.....	86
5.3.4 Μεταβλητές παράμετροι για κάθε επεισόδιο.....	87
5.3.4.1 Πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.....	87
5.3.4.2 Πλημμυρικό επεισόδιο Μαΐου 1991.....	88
5.3.4.3 Πλημμυρικό επεισόδιο Απριλίου 1991.....	89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο :

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 91

6.1 Αποτελέσματα των προσομοιώσεων.....	91
6.1.1 Πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.....	91
6.1.2 Πλημμυρικό επεισόδιο Μαΐου 1991.....	94
6.1.3 Πλημμυρικό επεισόδιο Απριλίου 1991.....	96
6.1.4 Στατιστικοί δείκτες επίδοσης.....	99
6.2 Συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις.....	100
6.2.1 Συμπεράσματα σχετικά με τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων.....	100
6.2.2 Συμπεράσματα σχετικά με τους στατιστικούς δείκτες.....	103
6.3 Ανάλυση ευαισθησίας.....	105
6.3.1 K (Muskingum).....	106
6.3.2 Χρόνος υστέρησης T _p (Snyder).....	108
6.3.3 Συντελεστής C _p (Snyder).....	110
6.3.4 Αρχικές απώλειες I _a (SCS).....	112
6.3.5 Αναλογία R ως προς την παροχή αιχμής (εκθετική μείωση της βασικής απορροής).....	114
6.3.6 Σταθερά εκθετικής μείωσης k (εκθετική μείωση της βασικής απορροής).....	115
6.3.7 Διαγράμματα διαφοράς παροχών (και ποσοστιαίες).....	118
6.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	120

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ..... 122**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ :**

A.1 Ύψη βροχής.....	125
A.1.1 Επεισόδιο 7-10 Δεκεμβρίου 1989.....	125
A.1.2 Επεισόδιο 6-7 Απριλίου 1991.....	128
A.1.3 Επεισόδιο 9-11 Μαΐου 1991.....	130
A.2 Αριθμός καμπύλης (Curve Number).....	132
A.2.1 Αναλυτικός χάρτης χρήσεων γης.....	132
A.2.2 Πίνακας αριθμού καμπύλης για κάθε χρήση γης.....	132

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο :

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εικόνα 1.1 : Ο υδρολογικός κύκλος του νερού.....	2
--	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο :

ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Εικόνα 2.1 : Υδρολογικό διαμέρισμα Θεσσαλίας.....	9
Εικόνα 2.2 : Υπερετήσια βροχόπτωση στον Ελλαδικό χώρο.....	11
Εικόνα 2.3 : Υπερετήσια βροχόπτωση στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας..	12
Εικόνα 2.4 : Προταθείσες θέσεις φραγμάτων και αντίστοιχες λεκάνες απορροής.....	15
Εικόνα 2.5 : Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης.....	24
Εικόνα 2.6 : Χάρτης ευρύτερων χρήσεων γης.....	25

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο :

ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ – Σ.Γ.Π – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

HEC – HMS

Εικόνα 3.1: Περιβάλλον εργασίας του HEC – HMS ενώ δουλεύουμε πάνω στο project ‘Castro Valley’ το οποίο παρέχεται σαν παράδειγμα για εξάσκηση στο πρόγραμμα.....	35
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο :

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Εικόνα 4.1: Τυπική διάταξη σταθμηγράφου.....	48
Εικόνα 4.2 : Διάταξη σταθμών στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής.....	49

Εικόνα 4.3: Διαχωρισμός σφηνοειδούς και πρισματικής αποθήκευσης σε τμήμα ποταμού.....	72
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο :

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC – HMS ΓΙΑ ΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ

Εικόνα 5.1 : Σχηματική απεικόνιση της περιοχής μελέτης για την προσομοίωσή της με το HEC – HMS.....	82
---	----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ :

Εικόνα Α.2.1 : Αναλυτικός χάρτης χρήσεων γης.....	132
---	-----

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο :

ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Πίνακας 2-1 : Χαρακτηριστικά μεγέθη της λεκάνης απορροής.....	24
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο :

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Πίνακας 4-1 : Στοιχεία σταθμών περιοχής μελέτης.....	49
Πίνακας 4-2 : Συνολικό ύψος βροχής σταθμού Καρδίτσας.....	56
Πίνακας 4-3 : Στατιστικοί δείκτες επίδοσης για την βαθμονόμηση του ομοιώματος.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο :

ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC – HMS ΓΙΑ ΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ

Πίνακας 5-1 : Τιμές φυσικών χαρακτηριστικών υπολεκανών περιοχής μελέτης.....	85
Πίνακας 5-2 : Αρχικές και βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων προτύπου άμεσης απορροής.....	85
Πίνακας 5-3 : Αρχικές και βελτιστοποιημένες τιμές αριθμού καμπύλης CN.....	86
Πίνακας 5-4 : Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρων προτύπου Muskingum.....	86
Πίνακας 5-5 : Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρου Ia για το πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989 (αιχμή 10/12/1989).....	87
Πίνακας 5-6 : Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρων k και R για το πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989 (αιχμή 10/12/1989).....	88
Πίνακας 5-7 : Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρου Ia για το πλημμυρικό επεισόδιο Μαΐου 1991 (αιχμή 11/5/1991).....	89
Πίνακας 5-8 : Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρων k και R για το	

πλημμυρικό επεισόδιο Μαΐου 1991 (αιχμή 11/5/1991).....	89
Πίνακας 5-9 : Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρου Ια για το πλημμυρικό επεισόδιο Απριλίου 1991 (αιχμή 8/4/1991).....	90
Πίνακας 5-10 : Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρων k και R για το πλημμυρικό επεισόδιο Απριλίου 1991 (αιχμή 8/4/1991).....	90

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο :

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πίνακας 6-1 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων για το επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.....	93
Πίνακας 6-2 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων για το επεισόδιο Μαΐου 1991.....	96
Πίνακας 6-3 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων για το επεισόδιο Απριλίου 1991.....	98
Πίνακας 6-4 : Στατιστικοί δείκτες επίδοσης της βαθμονόμησης για κάθε επεισόδιο.....	99
Πίνακας 6-5 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από μεταβολή του K κατά -30%, -15%, +15%, +30%.....	107
Πίνακας 6-6 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από τις τιμές του Ct : 1.80 , 2.00 και 2.20.....	109
Πίνακας 6-7 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από τις τιμές του Cr : 0.54 , 0.67 και 0.80.....	111
Πίνακας 6-8 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από μεταβολή του Ια κατά -30%, -15%, +15%, +30%.....	113
Πίνακας 6-9 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από μεταβολή του R κατά -30%, -15%, +15%, +30%.....	115
Πίνακας 6-10 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από μεταβολή του k κατά -30%, -15% και από την μέγιστη τιμή k =1.00.....	117

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ :

Πίνακας Α.1.1 : Επεισόδιο 7-10 Δεκεμβρίου 1989 (ύψη βροχής).....	125
Πίνακας Α.1.2 : Επεισόδιο 6-7 Απριλίου 1991 (ύψη βροχής).....	128
Πίνακας Α.1.3 : Επεισόδιο 9-11 Μαΐου 1991 (ύψη βροχής).....	130
Πίνακας Α.2.2 : Πίνακας αριθμού καμπύλης για κάθε χρήσης γης.....	132

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο :**ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ – Σ.Γ.Π – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ****HEC – HMS**

Διάγραμμα 3-1: Συμμετοχή ArcView, HEC – GeoHMS και Spatial Analyst στην διαδικασία προσομοίωσης πλημμυρικού γεγονότος με χρήση του υδρολογικού ομοιώματος HEC-HMS.....	33
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο :**ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ**

Διάγραμμα 4-1 : Υετόγραμμα σταθμού ‘Μεγάλη Κερασιά’ για το επεισόδιο 7-10 Δεκεμβρίου 1989.....	52
Διάγραμμα 4-2 : Υετόγραμμα σταθμού ‘Δρακότρυπα’ για το επεισόδιο 7-10 Δεκεμβρίου 1989.....	52
Διάγραμμα 4-3 : Υετόγραμμα σταθμού ‘Καρδίτσα’ για το επεισόδιο 7-10 Δεκεμβρίου 1989.....	53
Διάγραμμα 4-4 : Υετόγραμμα σταθμού ‘Μεγάλη Κερασιά’ για το επεισόδιο 6-7 Απριλίου 1991.....	53

Διάγραμμα 4-5 :	Υετόγραμμα σταθμού ‘Δρακότρυπα’ για το επεισόδιο 6-7 Απριλίου 1991.....	54
Διάγραμμα 4-6 :	Υετόγραμμα σταθμού ‘Μεγάλη Κερασιά’ για το επεισόδιο 9-11 Μαΐου 1991.....	54
Διάγραμμα 4-7 :	Υετόγραμμα σταθμού ‘Δρακότρυπα’ για το επεισόδιο 9-11 Μαΐου 1991.....	55
Διάγραμμα 4-8 :	Καμπύλη στάθμης – παροχής.....	57
Διάγραμμα 4-9 :	Παρατηρημένο πλημμυρογράφημα στη θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο βροχόπτωσης 7-10 Δεκεμβρίου 1989.....	58
Διάγραμμα 4-10 :	Παρατηρημένο πλημμυρογράφημα στη θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο βροχόπτωσης 6-7 Απριλίου 1991.....	58
Διάγραμμα 4-11 :	Παρατηρημένο πλημμυρογράφημα στη θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο βροχόπτωσης 9-11 Μαΐου 1991.....	59
Διάγραμμα 4-12 :	Διαχωρισμός υδρογραφήματος σε άμεση και βασική απορροή με εφαρμογή του προτύπου εκθετικής μείωσης.....	65
Διάγραμμα 4-13 :	Αναπαράσταση βασικής απορροής με το πρότυπο εκθετικής μείωσης στο HEC-HMS.....	66
Διάγραμμα 4-14 :	Συνδυασμός των τιμών K , χ και Δt ώστε η λύση του προβλήματος διόδευσης που θα προκύψει με την μέθοδο Muskingum να είναι ευσταθής.....	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο :

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διάγραμμα 6-1 :	Σύγκριση παρατηρημένου και ημιβαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.....	92
Διάγραμμα 6-2 :	Σύγκριση παρατηρημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’	

	για το επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.....	92
Διάγραμμα 6-3 :	Σύγκριση παρατηρημένου, ημιβαθμονομημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.....	93
Διάγραμμα 6-4 :	Σύγκριση παρατηρημένου και ημιβαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Μαΐου 1991.....	94
Διάγραμμα 6-5 :	Σύγκριση παρατηρημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Μαΐου 1991.....	95
Διάγραμμα 6-6 :	Σύγκριση παρατηρημένου, ημιβαθμονομημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Μαΐου 1991.....	95
Διάγραμμα 6-7 :	Σύγκριση παρατηρημένου και ημιβαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Απριλίου 1991.....	97
Διάγραμμα 6-8 :	Σύγκριση παρατηρημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Απριλίου 1991.....	97
Διάγραμμα 6-9 :	Σύγκριση παρατηρημένου, ημιβαθμονομημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Απριλίου 1991.....	98
Διάγραμμα 6-10:	Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από την μεταβολή του K κατά -30%, -15%, +15%, +30%.....	106
Διάγραμμα 6-11:	Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από τις τιμές του Ct : 1.80 , 2.00 και 2.20.....	108
Διάγραμμα 6-12:	Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από τις τιμές του Cr : 0.54 , 0.67 και 0.80.....	110
Διάγραμμα 6-13 :	Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από την μεταβολή του Ia κατά -30%, -15%, +15%, +30%.....	112
Διάγραμμα 6-14:	Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με	

αυτά που προκύπτουν από την μεταβολή του R κατά -30%, -15%, +15%, +30%.....	114
Διάγραμμα 6-15: Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από την μεταβολή του k κατά -30%, -15% και από την μέγιστη τιμή του $k=1.00$	116
Διάγραμμα 6-16: Σύγκριση των διαφορών στις παροχές μεταξύ πλημμυρογραφημάτων που προήλθαν από μείωση της παραμέτρου κατά 30% (ή αντίστοιχα μείωση έως την ελάχιστη τιμή της) με βάση το βαθμονομημένο.....	118
Διάγραμμα 6-17: Σύγκριση των διαφορών στις παροχές μεταξύ πλημμυρογραφημάτων που προήλθαν από αύξηση της παραμέτρου κατά 30% (ή αντίστοιχα αύξηση έως την μέγιστη τιμή της) με βάση το βαθμονομημένο.....	119
Διάγραμμα 6-18: Σύγκριση των ποσοστιαίων διαφορών στις παροχές μεταξύ πλημμυρογραφημάτων που προήλθαν από μείωση της παραμέτρου κατά 30% (ή αντίστοιχα μείωση έως την ελάχιστη τιμή της) με βάση το βαθμονομημένο.....	119
Διάγραμμα 6-19: Σύγκριση των ποσοστιαίων διαφορών στις παροχές μεταξύ πλημμυρογραφημάτων που προήλθαν από αύξηση της παραμέτρου κατά 30% (ή αντίστοιχα αύξηση έως την μέγιστη τιμή της) με βάση το βαθμονομημένο.....	120

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η υδρολογική ανάλυση της απόκρισης της λεκάνης απορροής του Πηνειού σε πλημμυρικά επεισόδια. Για την ανάλυση αυτή επιλέχθηκαν τρία πλημμυρικά επεισόδια από τα οποία τα δύο χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του μοντέλου και την εύρεση των τιμών των παραμέτρων που θα είναι σταθερές για κάθε επεισόδιο και το τρίτο για την επαλήθευση του μοντέλου.

Η ανάλυση αφορά στην λεκάνη απορροής του ποταμού Πηνειού, συνολικής έκτασης 2881.96 km², την οποία έχουμε χωρίσει σε τρεις υπολεκάνες. Τα πρωτογενή δεδομένα, δηλαδή ύψη βροχής και παροχή, προέρχονται από τους βροχογραφικούς σταθμούς ‘Μεγάλη Κερασιά’, ‘Καρδίτσα’ και ‘Δρακότρυπα’ και από τον σταθμηγραφικό σταθμό ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’. Για την επεξεργασία των δεδομένων και την προσομοίωση της λεκάνης απορροής, χρησιμοποιήθηκε το υδρολογικό μοντέλο HEC – HMS σε συνδυασμό με το Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών ArcView.

Για την προσομοίωση των επιμέρους συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου, επιλέξαμε τις καταλληλότερες των μαθηματικών μεθόδων που παρέχει το πρόγραμμα. Για το πρότυπο των απωλειών επιλέξαμε τη μέθοδο SCS (αριθμού καμπύλης CN), για το πρότυπο της άμεσης απορροής το μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder, για το πρότυπο βασικής απορροής την μέθοδο της εκθετικής μείωσης και για το πρότυπο της διόδευσης στον ποταμό την μέθοδο Muskingum.

Για την διαδικασία της βαθμονόμησης, όπως ήδη αναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκαν δύο πλημμυρικά επεισόδια και έγινε σύγκριση των εκτιμημένων παροχών με τις παρατηρημένες στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’. Βρέθηκαν έτσι, με τη μέθοδο ‘δοκιμής σφάλματος’, οι τιμές των παραμέτρων οι οποίες θα είναι σταθερές για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο. Με σταθερές πλέον αυτές τις παραμέτρους και χρήση του αλγόριθμου Univariate Gradient και της αντικειμενικής συνάρτησης ‘άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών’, υπολογίσαμε και τις υπόλοιπες παραμέτρους οι οποίες όμως παίρνουν διαφορετική τιμή για κάθε επεισόδιο. Το τρίτο επεισόδιο χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση του ομοιώματος ενώ για την επίδοση της βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις στατιστικοί δείκτες.

Καταλήξαμε λοιπόν στα βαθμονομημένα πλημμυρογραφήματα και προχωρήσαμε στην ανάλυσή τους και στην εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων τόσο για την μορφή τους όσο και για τις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων. Το τελευταίο στάδιο της παρούσης εργασίας ήταν η ‘ανάλυση ευαισθησίας’. Παρακολουθήσαμε δηλαδή την ευαισθησία της απόκρισης της λεκάνης σε μεταβολές των τιμών κάποιων από τις παραμέτρους. Με την βοήθεια επιλεγμένων διαγραμμάτων και την ανάλυσή τους εξήγαμε και εδώ συμπεράσματα που αφορούν στο κατά πόσο επηρεάζει την απόκριση της λεκάνης η αυξομείωση μιας παραμέτρου όταν οι υπόλοιπες διατηρούνται σταθερές.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ο ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΥΚΛΟΣ

Ο υδρολογικός κύκλος, ή αλλιώς ο κύκλος του νερού, περιγράφει την παρουσία και την κυκλοφορία του νερού στην επιφάνεια της γης, κάτω και πάνω απ' αυτή. Το νερό της γης είναι πάντα σε κίνηση και πάντα σε αλλαγή, από την υγρή μορφή στην αέρια ή σε πάγο και αντίστροφα. Ο κύκλος του νερού λειτουργεί εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια και η ζωή στη γη εξαρτάται άμεσα απ' αυτόν. Μια σχηματική αναπαράστασή του απεικονίζεται στην εικόνα 1.1.

Σαν κύκλος που είναι, ο υδρολογικός κύκλος δεν έχει αρχή, αλλά είναι βολικό να ξεκινήσει κανείς απ' τη θάλασσα. Ο ήλιος, που κινεί τον κύκλο αυτό, θερμαίνει το νερό στη θάλασσα (στους ωκεανούς) το οποίο εν μέρει εξατμίζεται και ανυψώνεται με τη μορφή ατμού στον αέρα. Νερό εξατμίζεται επίσης από τις λίμνες, τα ποτάμια και το έδαφος. Η διαπνοή των φυτών είναι μια ακόμη λειτουργία που αποδίδει υδρατμούς στην ατμόσφαιρα. Η εξάτμιση και η διαπνοή από την ξηρά, συχνά δεν διακρίνονται και έτσι μιλάμε για εξατμισοδιαπνοή. Μια μικρή ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα προέρχεται από την εξάχνωση, μέσω της οποίας μόρια από πάγους και χιόνια μετατρέπονται απευθείας σε υδρατμούς χωρίς να περάσουν από την υγρή μορφή. Ανοδικά ρεύματα αέρα ανεβάζουν τους υδρατμούς στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου οι μικρότερες πιέσεις που επικρατούν, έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας. Επειδή όμως σε χαμηλή θερμοκρασία ο αέρας δεν μπορεί πια να συγκρατεί όλη τη μάζα των υδρατμών, ένα μέρος τους συμπυκνώνεται και σχηματίζει τα σύννεφα. Τα ρεύματα του αέρα κινούν τα σύννεφα γύρω απ' την υδρόγειο. Παράλληλα, τα σταγονίδια νερού που σχηματίζουν τα σύννεφα συγκρούονται και μεγαλώνουν, και τελικά πέφτουν απ' τον ουρανό ως κατακρημνίσματα, η συχνότερη μορφή των οποίων είναι η βροχή. Μια άλλη μορφή κατακρημνίσματος είναι το χιόνι, το οποίο όταν συσσωρεύεται, σχηματίζει πάγους και παγετώνες. Σε σχετικά θερμότερα κλίματα, όταν έρχεται η άνοιξη, το χιόνι λιώνει και το παραγόμενο νερό ρέει, σχηματίζοντας απορροή.

Η μεγαλύτερη ποσότητα κατακρημνισμάτων πέφτει απευθείας στους

ωκεανούς. Από την ποσότητα που πέφτει στη στεριά, ένα σημαντικό μέρος καταλήγει και πάλι στους ωκεανούς ρέοντας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ως επιφανειακή απορροή. Η μεγαλύτερη ποσότητα της επιφανειακής απορροής μεταφέρεται στους ωκεανούς από τα ποτάμια, με τη μορφή ροής σε υδατορεύματα. Η επιφανειακή απορροή μπορεί ακόμη να καταλήξει στις λίμνες, που αποτελούν, μαζί με τους ποταμούς, τις κυριότερες αποθήκες γλυκού νερού. Ωστόσο, το νερό των κατακρημνισμάτων δεν ρέει αποκλειστικά μέσα στους ποταμούς. Κάποιες ποσότητες διαπερνούν το έδαφος με τη λειτουργία της διήθησης και σχηματίζουν το υπόγειο νερό. Μέρος του νερού αυτού μπορεί να ξαναβρεί το δρόμο του προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα (και τους ωκεανούς) ως εκφόρτιση υπόγειου νερού. Όταν βρίσκει διόδους προς της επιφάνεια της γης εμφανίζεται με τη μορφή πηγών. Ένα άλλο μέρος του υπόγειου νερού πηγαίνει βαθύτερα και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν τεράστιες ποσότητες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ακόμα και το νερό αυτό όμως συνεχίζει να κινείται και με την πάροδο του χρόνου, μέρος του, ξαναμπαίνει στους ωκεανούς όπου ο κύκλος του νερού "τελειώνει" ... και "ξεκινάει".



Εικόνα 1.1 : Ο υδρολογικός κύκλος του νερού

1.2 ΤΟ ΥΔΑΤΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ

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 νερού στη λεκάνη ΔS , σε καθορισμένο χρόνο Δt .

Η εισροή συνίσταται σε βροχόπτωση, χιονόπτωση, χαλάζι και άλλες μορφές κατακρήμνισης ενώ οι συνηθέστερες συνιστώσες εκροής είναι η επιφανειακή απορροή, η ενδιάμεση απορροή, η υπόγεια απορροή, η εξάτμιση, η διαπνοή και η διήθηση. Η αποθήκευση της λεκάνης έχει κι αυτή διάφορες συνιστώσες, όπως είναι η επιφανειακή αποθήκευση (πάνω στο έδαφος, συμπεριλαμβανομένης και της αποθήκευσης σε υδατορεύματα και ταμιευτήρες), η υπεδάφια αποθήκευση (μέσα στη ριζική ζώνη), η υπόγεια αποθήκευση (μέσα στους υδροφορείς) και η παρεμπόδιση (από βλάστηση, κτίρια κλπ). Οι παραπάνω παράγοντες συνοψίζονται στην ακόλουθη βασική εξίσωση υδρολογικού ισοζυγίου:

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

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

1.3 ΟΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ ΜΑΣ

Η χώρα μας διαθέτει, συνολικά, επαρκείς επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους, αλλά διάφοροι λόγοι μειώνουν σημαντικά την πραγματική διαθέσιμη ποσότητα και δυσκολεύουν την αξιοποίησή τους. Οι κυριότεροι λόγοι που προκαλούν προβλήματα στην αξιοποίηση των υδατικών πόρων της χώρας είναι:

- η ανομοιόμορφη κατανομή των υδατικών πόρων στο χώρο και στο χρόνο

- η ανομοιόμορφη κατανομή της ζήτησης στο χώρο και το χρόνο, αναντίστοιχη με την κατανομή της προσφοράς
 - η γεωμορφολογία της χώρας
 - η εξάρτηση της βόρειας Ελλάδας από τις επιφανειακές απορροές ποταμών που έρχονται από γειτονικά κράτη
 - το μεγάλο ανάπτυγμα ακτών
 - τα πολλά άνυδρα ή με ελάχιστους υδατικούς πόρους νησιά της χώρας.
- (ΥΠΑΝ, 2003).

Στενή σχέση με τη διαθέσιμη ποσότητα νερού έχει βέβαια και η ποιότητα, η οποία είναι το αποτέλεσμα αλληλεπίδρασης φυσικών συνθηκών και ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Αν και η Ελλάδα είχε γενικά νερά καλής ποιότητας, οι μακροχρόνιες, χωρίς προγραμματισμό και έλεγχο ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν αρχίσει να κάνουν εμφανή τα τελευταία χρόνια την υποβάθμιση τους, τόσο στους επιφανειακούς όσο και στους υπόγειους υδατικούς πόρους.

Συμπερασματικά, για τους υδατικούς πόρους της χώρας επισημαίνεται ότι η διαθέσιμη ποσότητα νερού συνεχώς ελαττώνεται, έτσι ώστε σημαντικές περιοχές είναι ή τείνουν να γίνουν ελλειμματικές σε νερό, ενώ οι σοβαρότερες συλλογικές ανάγκες καλύπτονται πια από έργα μεταφοράς, με σημαντικά αυξημένο κόστος κατασκευής και λειτουργίας. Η ποιοτική τους κατάσταση δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα οξυμμένα προβλήματα, εκτός από μεμονωμένες περιοχές και παράκτιες ζώνες, τουλάχιστον στα πλαίσια των μέχρι τώρα θεσμικών ρυθμίσεων για την ποιότητα. Θα πρέπει όμως να επισημανθεί ότι η διαμορφούμενη, σε ευρωπαϊκό επίπεδο, τάση αναβάθμισης της ποιότητας των υδατικών πόρων δεν επιτρέπει εφησυχασμό και επιτάσσει την αναθεώρηση των μέχρι τώρα αξιολογήσεων.

Σημαντική αιτία ρύπανσης αποτελούν οι γεωργικές δραστηριότητες, πηγές μη σημειακές και ως εκ τούτου, δύσκολα αντιμετωπίσιμες. Αξιόλογη πρόοδος παρουσιάζεται στην αντιμετώπιση της ρύπανσης από αστικά λύματα (σημειακές πηγές), ενώ αντίθετα, δεν έχει επιτευχθεί σημαντική πρόοδος στα βιομηχανικά υγρά απόβλητα, όπου απαιτείται ενίσχυση των προσπαθειών προεπεξεργασίας τους και συγκέντρωσης των μονάδων σε βιομηχανικές περιοχές.

Στη εποχή μας οι αναπτυγμένες χώρες έχουν ήδη αξιοποιήσει, μέσω κατάλληλων αναπτυξιακών έργων, το μεγαλύτερο ποσοστό του υδατικού δυναμικού

τους. Τα υδραυλικά έργα που χρειάζονται για το υπόλοιπο ανεκμετάλλευτο ποσοστό είναι υψηλού, δύσκολα αποσβέσιμου κόστους, στο οποίο πρέπει να προστεθεί και μια σημαντική νέα συνιστώσα, το περιβαλλοντικό κόστος. Κατά συνέπεια, η ορθολογικότερη χρήση του νερού και η βελτίωση της διαχείρισης των υδροσυστημάτων, χωρίς απαραίτητα την προσθήκη νέων έργων, αποτελούν προφανείς εναλλακτικές λύσεις. Έτσι, η προσοχή των επιστημόνων, και των τεχνικών και πολιτικοοικονομικών φορέων, έχει στραφεί και προς μη κατασκευαστικές κατευθύνσεις. Στην Ελλάδα, όπως και σε άλλες χώρες, η κατασκευή υδραυλικών έργων δεν έχει ακόμη ολοκληρωθεί. Ωστόσο, και εδώ η καλύτερη διαχείριση των υδροσυστημάτων αποκτά όλο και μεγαλύτερη σημασία, δεδομένου ότι οι ωφέλειες που προκύπτουν είναι μεγάλες, χωρίς να απαιτούνται σημαντικοί οικονομικοί πόροι.

1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός (World Meteorological Organization) έχει προειδοποιήσει ότι τα ακραία καιρικά φαινόμενα βρίσκονται σε ανοδική πορεία, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας της γης και της αλλαγής του κλίματος. Οι μεγάλες πλημμύρες που συνέβαιναν μόνο κάθε 100 χρόνια, τώρα είναι πιθανό να εμφανίζονται κάθε 10 ή κάθε 20 χρόνια. Βέβαια, η κλιματική αλλαγή δεν είναι η μόνη αιτία πρόκλησης πλημμυρών. Άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες παίζουν επίσης βασικό ρόλο, όπως για παράδειγμα η καταστροφή των δασικών εκτάσεων που βρίσκονται ανάντη των ρευμάτων των ποταμών οι οποίες έχουν την δυνατότητα να απορροφούν τεράστιες ποσότητες νερού.

Οι επιπτώσεις των πλημμυρών μπορεί να είναι ολέθριες, από την καταστροφή σπιτιών, καλλιεργειών και άλλων περιουσιακών στοιχείων μέχρι τις απειλές για την άγρια πανίδα και τις απώλειες ανθρώπινων ζώων. Πως μπορούν λοιπόν να αντιμετωπιστούν οι πλημμύρες και οι συνέπειές τους; Σίγουρα είναι απαραίτητη η ύπαρξη σχεδίου δράσης μετά την εκδήλωση κάθε ακραίου επεισοδίου. Το κλειδί όμως βρίσκεται στις έννοιες της πρόληψης και της πρόβλεψης. Ήδη για την επιτυχή πρόβλεψη πλημμυρικών επεισοδίων έχουν γίνει πολλά βήματα προόδου με τη χρήση ολοένα και πιο σύγχρονων υδρολογικών και στατιστικών μοντέλων. Πολύ σημαντικό

είναι όμως να έχουν κατασκευαστεί τα απαραίτητα αντιπλημμυρικά έργα τα οποία θα είναι σε θέση να ανταποκριθούν σε οποιοδήποτε όγκου επεισόδιο. Ο σχεδιασμός των αντιπλημμυρικών αυτών έργων βασίζεται κυρίως στις παροχές πλημμύρας, σχεδιάζονται δηλαδή με βάση το ισχυρότερο επεισόδιο των τελευταίων ετών αλλά και με βάση την πιθανότητα επανάληψης αυτού.

Η αποτελεσματικότητα, λοιπόν, των αντιπλημμυρικών έργων καθορίζεται από την αξιοπιστία και την εγκυρότητα των υδρολογικών ομοιωμάτων που χρησιμοποιούνται κατά τον σχεδιασμό τους. Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην δημιουργία ενός ομοιώματος, το οποίο θα είναι σε θέση να αναλύσει το οποιοδήποτε πλημμυρικό επεισόδιο θα εκδηλωθεί στην συγκεκριμένη λεκάνη απορροής του Πηνειού και να εκτιμήσει την υδρολογική απόκρισή της. Αποτελεί ένα πρώτο στάδιο εκτίμησης, φυσικά με κάποιες αδυναμίες που οφείλονται κυρίως στην εξάρτηση αυτού από την εγκυρότητα και την διαθεσιμότητα πρωτογενών δεδομένων. Υπάρχουν πολλά σημεία τα οποία με περαιτέρω ανάλυση, επεξεργασία και αξιολόγηση είναι σε θέση να προσδώσουν στο ομοίωμα ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία.

1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Εκτός από το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο, η εργασία αυτή περιλαμβάνει ακόμη πέντε κεφάλαια και ένα παράρτημα:

- Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια γενική περιγραφή του υδατικού διαμερίσματος της Θεσσαλίας καθώς επίσης και της περιοχής μελέτης, της ανάντη λεκάνης απορροής δηλαδή του ποταμού Πηνειού.
- Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αρχικά μια ταξινόμηση των υδρολογικών ομοιωμάτων και στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα προγράμματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσης εργασίας. Για το πρόγραμμα HEC – HMS γίνεται μια πιο αναλυτική παρουσίαση.
- Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά στην επιλογή και στην επεξεργασία των δεδομένων, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα επιλεγμένα μαθηματικά μοντέλα του προγράμματος και των παραμέτρων που υπεισέρχονται σε αυτά.

- Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του τρόπου επεξεργασίας με το μοντέλο HEC – HMS στην συγκεκριμένη λεκάνη απορροής της μελέτης μας και δίνονται οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από τις διαδικασίες της βαθμονόμησης και της επαλήθευσης.

- Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των πλημμυρογραφήματων κάθε επεισοδίου που προήλθαν από την επεξεργασία μέσω του προγράμματος και την διαδικασία της βαθμονόμησης καθώς και η σύγκριση αυτών με τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα. Γίνεται επίσης ο υπολογισμός στατιστικών δεικτών από τους οποίους συμπεραίνουμε το κατά πόσο επιτυχής είναι η εν λόγω προσομοίωση και παρουσιάζονται τα συνολικά εξαγόμενα συμπεράσματα στα οποία έχουμε καταλήξει. Το παρόν κεφάλαιο κλείνει με την ανάλυση της ευαισθησίας της απόκρισης της λεκάνης σε μεταβολές επιλεγμένων παραμέτρων.

- Στο παράρτημα Α παρατίθενται τα δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα, δηλαδή τα ύψη βροχής κάθε σταθμού και για κάθε επεισόδιο, το αναλυτικό ψηφιακό μοντέλο χρήσεων γης της λεκάνης απορροής και ο πίνακας με την τιμή του αριθμού καμπύλης για κάθε χρήση ξεχωριστά.

2 : ΥΔΑΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

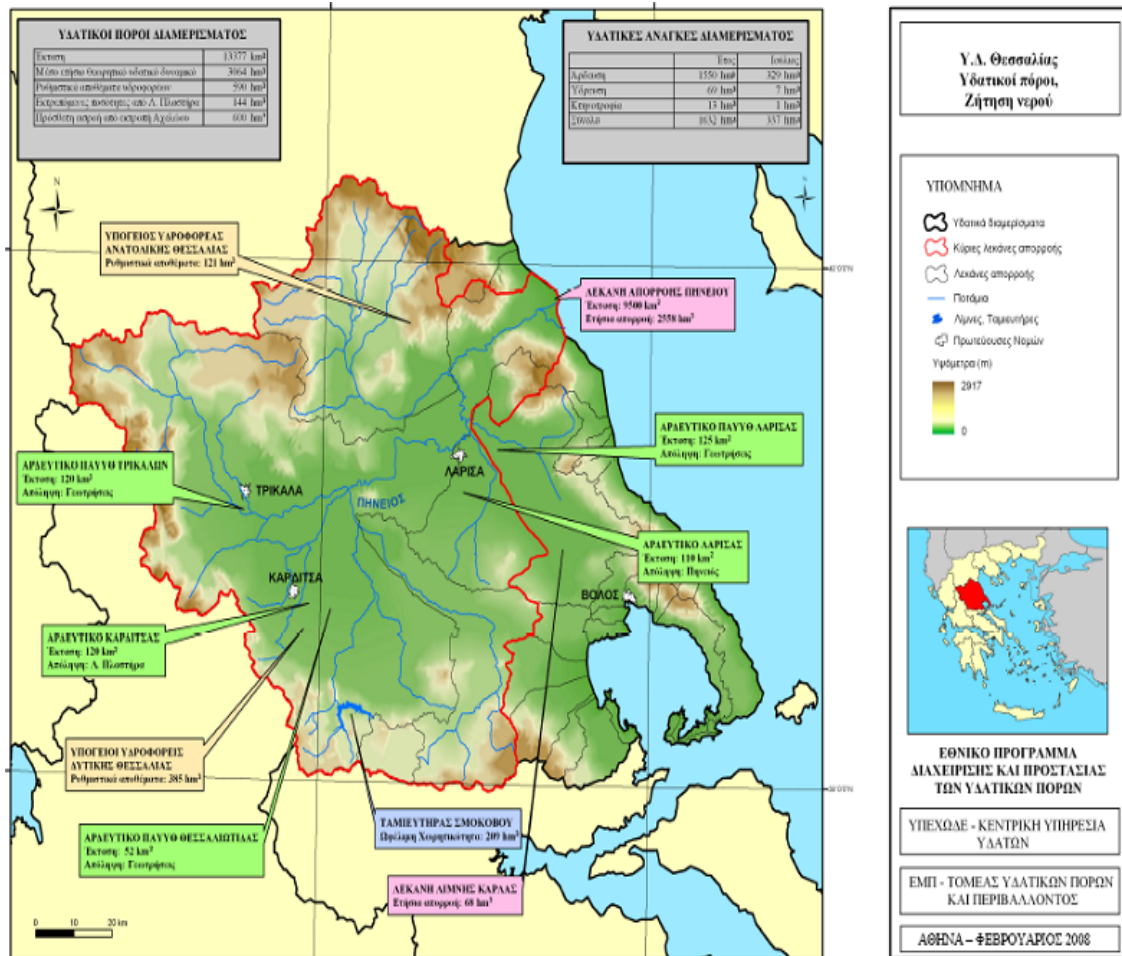
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ

Από γεωγραφικής άποψης, η Θεσσαλία ανήκει στο κεντρικό τμήμα της χώρας με εξαιρετικά πλούσια φυσιογραφία, διαθέτοντας τόσο πεδινές όσο ορεινές και παραλιακές εκτάσεις. Το υδατικό διαμέρισμα συμπίπτει σχεδόν με το αντίστοιχο γεωγραφικό. Μικρά μόνο τμήματα του γεωγραφικού διαμερίσματος Θεσσαλίας, κυρίως προς τα νότια και νοτιοδυτικά, ανήκουν σε γειτονικά υδατικά διαμερίσματα. Περιλαμβάνει ολόκληρο το νομό Λάρισας, μεγάλα τμήματα των νομών Μαγνησίας, Τρικάλων και Καρδίτσας, και μικρά τμήματα των νομών Γρεβενών, Πιερίας και Φθιώτιδας. Ορίζεται βόρεια από τον Όλυμπο, τα Πιέρια και τα Καμβούνια όρη, δυτικά από την οροσειρά της Πίνδου, από τη νότια Πίνδο και το όρος Όθρης και ανατολικά από το Αιγαίο Πέλαγος.

Ο πληθυσμός του γεωγραφικού διαμερίσματος, με βάση τα απογραφικά στοιχεία της ΕΣΥΕ, το 1991 ήταν 730945 κάτοικοι και το 2001 ήταν 750445 κάτοικοι, παρουσιάζοντας αύξηση 2.7% (www.statistics.gr - ΕΣΥΕ).

Το διαμέρισμα έχει εμβαδόν 13377 km² και αποτελείται κυρίως από τη λεκάνη απορροής του Πηνειού (περίπου 9500 km²), τις λεκάνες του Ξηρορέμματος, του Ξηριά καθώς και τις λεκάνες του Πηλίου. Η λεκάνη απορροής του Πηνειού περιλαμβάνει την Ανατολική πεδιάδα (Λαρίσης) και τη Δυτική πεδιάδα (Τρικάλων - Καρδίτσας). Ο Πηνειός ποταμός τροφοδοτείται από ένα μεγάλο αριθμό παραποτάμων με σημαντική απορροή. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι οι Μαλακασιώτικος, Καστανιώτικος, Κλεινοβίτικος, Πορταϊκός, Πάμισος, Μίκανης, Τιταρήσιος (Σαραντάπορος – Ελασσονίτικος), Καλέτζης, Σοφαδίτης, Ενιπέας, Ληθαίος και Νεοχωρίτης (αναλυτικότερα στην ενότητα 2.4.1 Επιφανειακοί υδατικοί πόροι).

Στην Εικόνα 2.1 εμφανίζονται τα όρια του υδατικού διαμερίσματος. Παρουσιάζονται ακόμη οι υδρολογικές λεκάνες του, οι υδατικοί του πόροι και τα σημαντικά έργα αξιοποίησης τους. Επίσης παρουσιάζονται στοιχεία όσον αφορά στις υδατικές ανάγκες του διαμερίσματος.



Εικόνα 2.1: Υδρολογικό διαμέρισμα Θεσσαλίας (Πηγή: «Μελέτη για το εθνικό πρόγραμμα διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων», 2008, ΥΠΕΧΩΔΕ - ΕΜΠ)

2.2 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ – ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Το διαμέρισμα παρουσιάζει απλή γεωμορφολογική εικόνα, με τα ορεινά τμήματά του περιμετρικά και τα πεδινά στις κεντρικές περιοχές. Υπάρχουν πέντε ορεινοί όγκοι, μεταξύ των οποίων ο Όλυμπος, με υψόμετρο 2 917 m, το υψηλότερο στην Ελλάδα. Το πεδινό τμήμα χωρίζεται σε ανατολική και δυτική περιοχή από τα χαμηλά Χαλκηδόνια Όρη. Οι δύο αυτές περιοχές είναι ανεξάρτητες από υδρογεωλογική άποψη. Το μέσο υψόμετρο του διαμερίσματος είναι 285 m.

Το Θεσσαλικό Πεδίο είναι τεκτονικό βύθισμα που περιβάλλεται από τις οροσειρές Ολύμπου - Καμβουνίων στα βόρεια, Πίνδου στα δυτικά, Όθρυος στα νότια και Πηλίου - Όσσας στα ανατολικά. Στο υδατικό διαμέρισμα αναπτύσσονται από τα ανατολικά προς τα δυτικά οι ακόλουθες γεωτεκτονικές ζώνες και ενότητες:

- Ενότητα Όσσας, που συναντάται στο ομώνυμο βουνό και στον Όλυμπο. Αποτελεί τεκτονικό παράθυρο και περιλαμβάνει φυλλίτες, μάρμαρα και δολομίτες.
- Πελαγονική Ζώνη, που συναντάται στο ανατολικό τμήμα του διαμερίσματος, το οποίο περιλαμβάνει κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και μάρμαρα, όπως επίσης και σε μεγάλο βαθμό γνεύσιους, σχιστόλιθους και αμφιβολίτες.
- Υποπελαγονική Ζώνη, που συναντάται στην κεντρική Θεσσαλία, με κύριο χαρακτηριστικό την εκτεταμένη ανάπτυξη των οφιολιθικών υπερβασικών πετρωμάτων του φλύσχη και των σχιστοκερατόλιθων.
- Ζώνη της Πίνδου, που αναπτύσσεται στα δυτικά όρια της πεδιάδας προς την οροσειρά της Πίνδου και αποτελείται από λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους σε εναλλαγές με σχιστοκερατόλιθους, όπως επίσης και φλύσχη.
- Στο δυτικό τμήμα της Θεσσαλικής πεδιάδας αναπτύσσονται τα μολασσικά ιζήματα της μεσοελληνικής αύλακας, που στη συγκεκριμένη θέση αποτελούνται κυρίως από μεγάλου πάχους συνεκτικά κροκαλοπαγή.
- Το πεδινό τμήμα του διαμερίσματος, όπως επίσης και τους λόφους που παρεμβάλλονται μεταξύ δυτικής και ανατολικής Θεσσαλίας, καλύπτουν σύγχρονα τεταρτογενή και νεογενή ιζήματα

Τα παραπάνω στοιχεία βασίστηκαν στη μελέτη του ΥΒΕΤ [1996].

2.3 ΚΛΙΜΑ

Το υδατικό διαμέρισμα διαιρείται σε τρεις περιοχές:

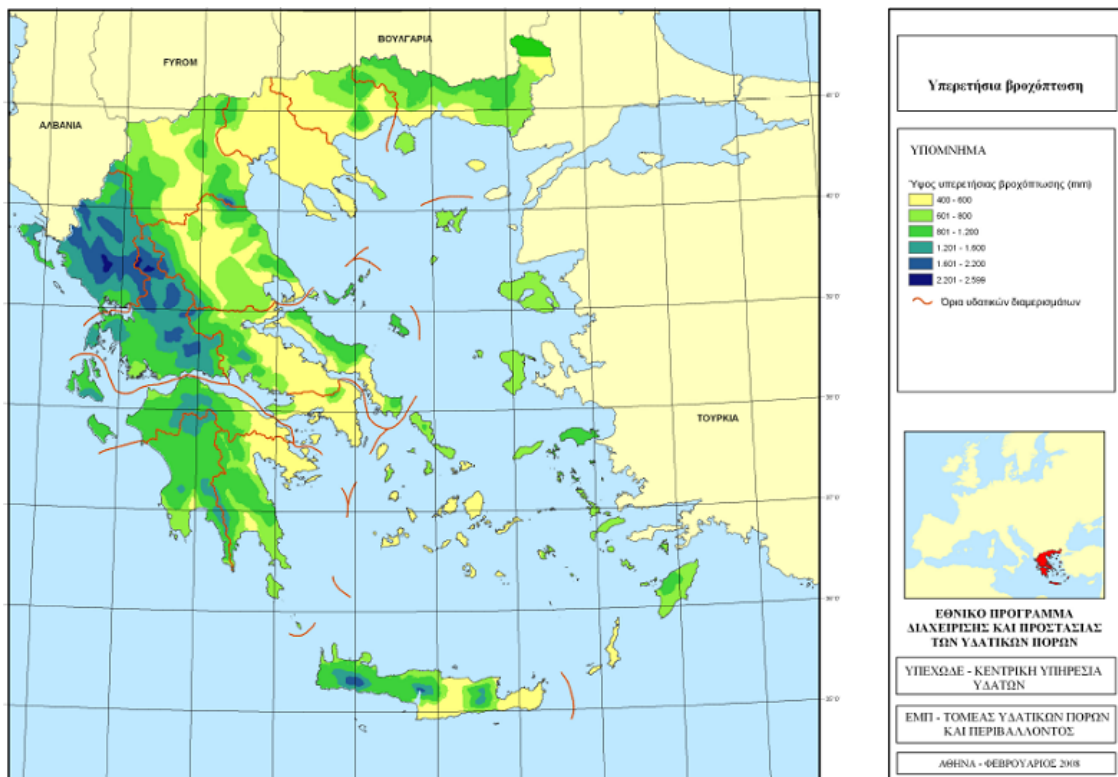
- Την ανατολική παράκτια και ορεινή, με μεσογειακό κλίμα.
- Την κεντρική πεδινή, με ηπειρωτικό κλίμα.
- Την δυτική ορεινή, με ορεινό κλίμα.

Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται από 16°C ως 17°C. Το ετήσιο

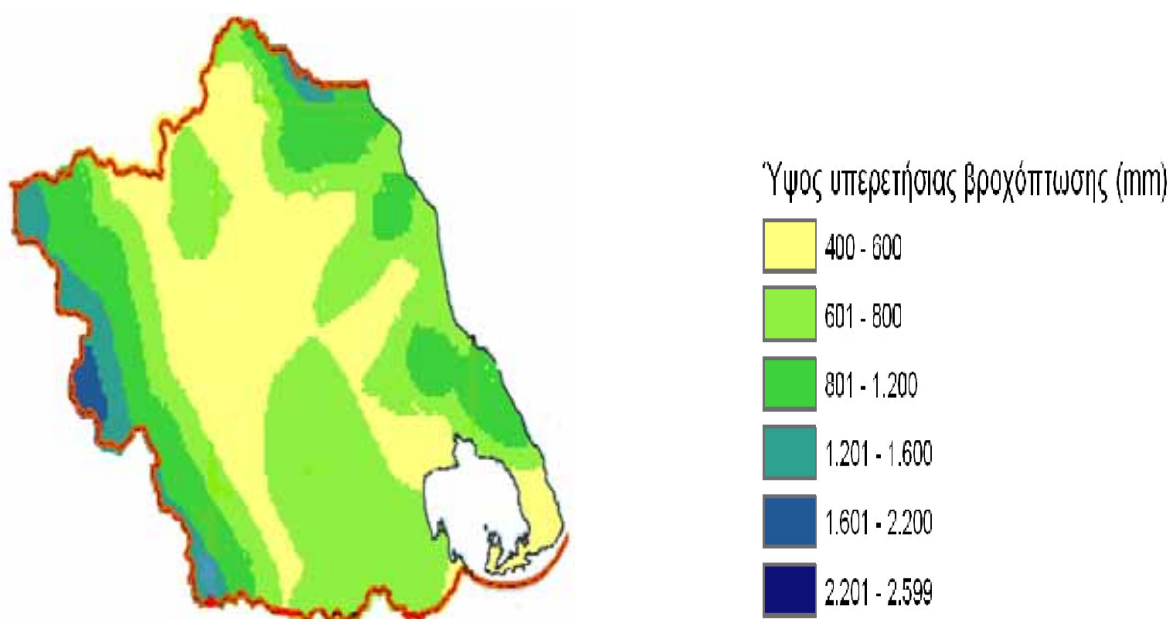
θερμομετρικό εύρος ξεπερνά τους 22°C. Οι πιο θερμοί μήνες είναι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος και οι πιο ψυχροί ο Ιανουάριος, ο Φεβρουάριος και ο Δεκέμβριος. Οι παγετοί είναι συχνοί και εμφανίζονται κατά την περίοδο Νοεμβρίου - Απριλίου. Οι ημέρες παγετού κυμαίνονται από 9,2 στο Βόλο σε 35,5 στη Λάρισα και 33,8 στα Τρίκαλα σε μέση ετήσια βάση.

Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στο διαμέρισμα είναι σχετικά μεγάλο στα δυτικά, στη συνέχεια μειώνεται στο πεδινό τμήμα και αυξάνεται πάλι στο ορεινό ανατολικό τμήμα. Ενδεικτικές τιμές της ετήσιας βροχόπτωσης είναι 468 mm στο σταθμό Λάρισας, 550 mm στο σταθμό Τυρνάβου και 1142 mm στον πιο ορεινό σταθμό του Μουζακίου [Κουτσογιάννης, 1988]. Στο σύνολο του διαμερίσματος, η μέση ετήσια επιφανειακή βροχόπτωση εκτιμάται σε 678 mm (Κ/Ξ Διαχείριση Υδάτων Κεντρικής & Δυτικής Ελλάδος, 2005).

Η υπερετήσια βροχόπτωση στον Ελλαδικό χώρο αλλά και πιο ειδικά στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας παρουσιάζεται στις Εικόνες 2.2. και 2.3 αντίστοιχα.



Εικόνα 2.2 : Υπερετήσια βροχόπτωση στον Ελλαδικό χώρο



Εικόνα 2.3 : Υπερετήσια βροχόπτωση στο υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας

Οι πιο βροχεροί μήνες για το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας είναι από τον Οκτώβριο ως τον Ιανουάριο, ενώ οι πιο ξηροί ο Ιούλιος και ο Αύγουστος. Οι χιονοπτώσεις είναι συνηθισμένες, ιδιαίτερα στα ορεινά του διαμερίσματος και γίνονται πιο έντονες από τα νότια προς τα βόρεια και από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Οι περισσότερες χιονοπτώσεις παρατηρούνται κατά τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Στα δυτικά και ορεινά τμήματα του διαμερίσματος αρχίζουν τον Σεπτέμβριο και φτάνουν μέχρι και τις αρχές Ιουλίου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο μέσος ετήσιος αριθμός ημερών χιονιού στη Λάρισα είναι 4,0 και στα Τρίκαλα 6,2. Οι χαλαζοπτώσεις είναι επίσης συχνές, κυρίως κατά τους μήνες Μάιο και Ιούνιο στα βόρεια του διαμερίσματος και κατά τους μήνες Φεβρουάριο ως Απρίλιο στο νοτιοανατολικό τμήμα.

Η μέση ετήσια νέφωση κυμαίνεται από 4 ως 5 βαθμίδες, με τις υψηλότερες τιμές να εμφανίζονται στα δυτικά και τις χαμηλότερες στα ανατολικά.

Η μέση ετήσια σχετική υγρασία κυμαίνεται από 67% μέχρι 72%. Στο νότιο τμήμα του διαμερίσματος εμφανίζεται ξηρή περίοδος 4 ως 5 μηνών στα ανατολικά, η οποία όμως μειώνεται βαθμιαία σε 2 ως 4 μήνες στα κεντρικά - δυτικά πεδινά και 1 ως 2 μήνες στα δυτικά ορεινά.

Η επικρατούσα φορά των ανέμων στο διαμέρισμα ποικίλει, (βορειοδυτικοί

και νότιοι στο Βόλο, ανατολικοί στη Λάρισα, δυτικοί στα Τρίκαλα).

2.4 ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

Οι υδατικοί πόροι του Υδατικού Διαμερίσματος της Θεσσαλίας αποτελούνται από επιφανειακά καθώς και από υπόγεια νερά. Δεδομένου ότι δεν υπάρχουν έργα ταμίευσης (με εξαίρεση τον Πλαστήρα), το επιφανειακό δυναμικό αναφέρεται στην παροχή των υδατορευμάτων, η οποία παρουσιάζει έντονη χωρική και χρονική διακύμανση. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι τα επιφανειακά νερά οροθετούνται από το ποτάμιο υδροσύστημα και τις αντίστοιχες υδρολογικές λεκάνες, ενώ τα υπόγεια από τα αντίστοιχα υδρογεωλογικά όρια, τα οποία όμως δεν ταυτίζονται με αυτά των επιφανειακών.

2.4.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΙ ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ

Τα επιφανειακά νερά, απαντώνται σε δύο μορφές: η μία είναι τα ποτάμια ύδατα, δηλαδή του Πηνειού και των κυρίων παραποτάμων του και η δεύτερη των φραγμάτων Πλαστήρα, ωφέλιμης χωρητικότητας 300 hm³ και Σμοκόβου*, ωφέλιμης χωρητικότητας 200 hm³ (ΥΠ.ΑΝ – Δημόσια διαβούλευση του έργου «Ανάπτυξη Συστημάτων και Εργαλείων Διαχείρισης Υδατικών Πόρων Υδατικών Διαμερισμάτων Δυτικής Στερεάς Ελλάδας, Ηπείρου, Αττικής, Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας & Θεσσαλίας», www.itia.ntua.gr).

* Η κατασκευή του φράγματος Σμοκόβου έχει περατωθεί, αλλά αυτή τη στιγμή το έργο δεν είναι σε επιχειρησιακή λειτουργία, ενώ πολύ μικρό μέρος του αρδευτικού δικτύου έχει ολοκληρωθεί. Για το λόγο αυτό, το φράγμα εντάσσεται στο σενάριο των μεσοπρόθεσμων έργων. («Μελέτη για το εθνικό πρόγραμμα διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων», 2008, ΥΠΕΧΩΔΕ - ΕΜΠ)

Η κύρια υδρολογική λεκάνη της περιοχής είναι, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, αυτή του Πηνειού. Οι κυριότεροι παραπόταμοι του Πηνειού είναι μέσου υδατικού δυναμικού, με παροχές εξαιρετικά μειωμένες κατά την καλοκαιρινή περίοδο.

Προς το νότο, παρατηρούνται αρκετοί παραπόταμοι με κυριότερους τους

Ενιπέα, Φαρσαλιώτη, Σοφαδίτικο και Καλέτζη. Οι ποταμοί αυτοί, συμβάλλουν στον Πηνειό κοντά στην περιοχή του χωριού Κεραμίδι και αποτελούν πολύ σημαντικό κλάδο του Πηνειού. Οι πηγές των ποταμών αυτών βρίσκονται στις νότιες ορεινές περιοχές στις οποίες δεν υπάρχει φράγμα υπό λειτουργία. Το φράγμα Ταυρωπού, είναι το μοναδικό εν λειτουργία φράγμα της περιοχής, αλλά η λεκάνη απορροής του υπάγεται στο υδατικό σύστημα του Αχελώου, παρ' ότι τα διοικητικά όρια του νομού Καρδίτσας το εμπεριέχουν. Κατά συνέπεια, τα εκτρεπόμενα νερά της λίμνης αυτής μπορούν να θεωρηθούν ως πρόσθετη ποσότητα.

Εκτός αυτού, στη νότια περιοχή, υπάρχει η αποξηραθείσα λίμνη Ξυνιάδα, η οποία μέσω του ποταμού Κουμαρόρρεμα στραγγίζει τα ύδατα της προς τον Σοφαδίτικο. Ακόμα, έχει προταθεί η κατασκευή φράγματος στη θέση Παλαιοδερλί του Ενιπέα.

Δυτικά, οι κυριότεροι ποταμοί είναι ο Πάμισος, ο Παλιούρης και ο Ληθαίος, οι οποίοι συμβάλλουν σε διάφορα σημεία με τον Πηνειό. Οι ταμιευτήρες που έχουν προταθεί για την περιοχή βρίσκονται στις θέσεις Πύλη του Πορταϊκού, Μουζάκι του Παμίσου, Κρύα Βρύση του Πηνειού (βορειοδυτικά) και Θεόπετρα του Ληθαίου.

Στην βόρεια και κεντρική περιοχή υπάρχει ο ποταμός Νεοχωρίτης, στον οποίο επίσης έχει προταθεί η κατασκευή φράγματος.

Στην Ανατολική περιοχή, προς βορρά, αναπτύσσεται ο Τιταρήσιος που συμβάλλει με τον Πηνειό στην περιοχή Ροδιά. Ο Τιταρήσιος αποτελεί έναν πολύ σημαντικό υδατικό πόρο για την περιοχή και μάλιστα έχουν προταθεί δύο ταμιευτήρες κοντά στις πηγές του ποταμού στις θέσεις Καλούδα και Παλαιομονάστηρο.

Οι προταθείσες θέσεις φραγμάτων με τις αντίστοιχες υπολεκάνες είναι οι εξής [Κουτσογιάννης κ.ά., 2001] (εικόνα 2.4):

A) Στη νότια περιοχή της λεκάνης του Πηνειού:

- Υπολεκάνη Ενιπέα ανάντη της θέσης φράγματος Παλαιοδερλί, με έκταση 427,6 km².

B) Στη δυτική περιοχή της λεκάνης του Πηνειού:

- Υπολεκάνη Παμίσου (Πλιούρη), ανάντη της θέσης φράγματος Μουζακίου, με

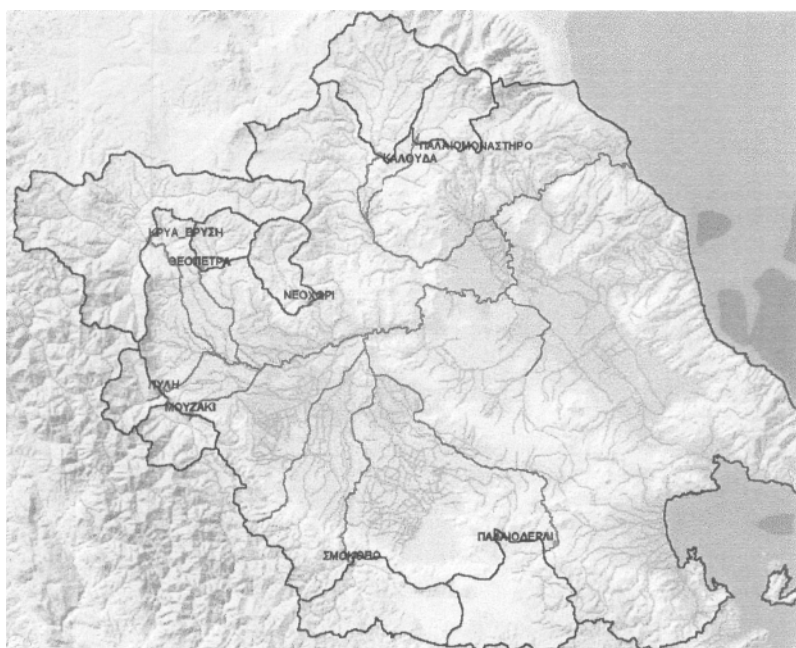
έκταση 146,8 km².

- Υπολεκάνη Πορταϊκού ανάντη της θέσης φράγματος Πύλης, με έκταση 133,8 km².
- Υπολεκάνη Πηνειού ανάντη της θέσης φράγματος Κρύας Βρύσης, με έκταση 952,7 km².

Γ) Στη βόρεια περιοχή της λεκάνης του Πηνειού:

- Υπολεκάνη Ληθαίου, ανάντη της θέσης φράγματος Θεόπετρας, με έκταση 127,8 km².
- Υπολεκάνη Νεοχωρίτη, ανάντη της θέσης φράγματος Νεοχωρίου, με έκταση 170,7 km².
- Υπολεκάνη Τιταρήσιου, ανάντη της θέσης φράγματος Καλούδας, με έκταση 466,5 km².
- Υπολεκάνη Ελασσονίτικου, ανάντη της θέσης φράγματος Παλαιομονάστηρου, με έκταση 209,8 km².

Τα παραπάνω στοιχεία ελήφθησαν από την μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εκτροπής του Αχελώου (Κουτσογιάννης κ.ά., 2001)



Εικόνα 2.4 : Προταθείσες θέσεις φραγμάτων και αντίστοιχες λεκάνες απορροής

2.4.2 ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

Στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας αναπτύσσονται σημαντικοί προσχωματικοί υδροφορείς, αλλά και μεγάλες καρστικές υδρογεωλογικές ενότητες. Όσον αφορά στην πρώτη κατηγορία υδροφορέων, η πεδιάδα της Θεσσαλίας διαχωρίζεται σε δύο κύριες υδρογεωλογικές λεκάνες, της δυτικής και ανατολικής Θεσσαλίας. Οι δύο λεκάνες διαχωρίζονται με λοφώδη περιοχή νεογενών αποθέσεων, που θεωρείται ξεχωριστή υδρογεωλογική ενότητα.

Στη δυτική Θεσσαλία αναπτύσσονται οι ακόλουθες προσχωματικές υδροφορίες [Καλλέργης, 1970]

- Κώνοι Πηνειού-Πορταϊκού-Παμίσου, στο δυτικό-βορειοδυτικό τμήμα της πεδιάδας, με υψηλού δυναμικού φρεάτιο υδροφορέα, που τροφοδοτείται από τις διηθήσεις των τριών ποταμών αλλά και από την κατείσδυση της βροχής, ενώ μέρος των διηθήσεων επανέρχεται στην επιφάνεια μέσω μεγάλων αλλουβιακών πηγών.
- Κώνος Σοφαδίτη, στον ομώνυμο ποταμό, με υψηλού δυναμικού φρεάτιο υδροφορέα, που μεταπίπτει σε υπό πίεση και τροφοδοτείται από τις διηθήσεις του ποταμού.
- Υπόλοιπο δυτικής πεδιάδας, με πολλούς επάλληλους υπό πίεση υδροφορείς που τροφοδοτούνται κυρίως από τους κώνους των παραποτάμων του Πηνειού, με βραδύτατο όμως ρυθμό, πράγμα που δυσχεραίνει την επαναπλήρωση των ποσοτήτων νερού που αντλούνται.

Στη ανατολική Θεσσαλία αναπτύσσονται οι ακόλουθες προσχωματικές υδροφορίες:

- Λεκάνη Τυρνάβου, που σχηματίστηκε από τις αδρομερείς αποθέσεις του ποταμού Τιταρήσιου και εμφανίζει ένα φρεάτιο υδροφορέα, ο οποίος στα ανατολικά μεταπίπτει σε υποπίεση, ενώ η κύρια τροφοδοσία γίνεται μέσω των διηθήσεων του Τιταρίσιου και δευτερευόντως από την κατείσδυση της βροχόπτωσης.
- Υπόλοιπη λεκάνη ανατολικής Θεσσαλίας (Λάρισα - Κάρλα), με βαθείς υπό πίεση υδροφορείς, με βραδεία τροφοδοσία, κυρίως από τις υπόγειες

πλευρικές μεταγγίσεις του κώνου του Τιταρήσιου.

Στη λοφώδη περιοχή Ταουσάνης αναπτύσσονται μόνο ανομοιογενή και ασυνεχή υδροφόρα στρώματα με εξαιρετικά δυσχερείς συνθήκες τροφοδοσίας, η οποία γίνεται κυρίως από την κατεισδύουσα βροχόπτωση.

Στην περίμετρο των δύο τμημάτων της Θεσσαλικής Πεδιάδας αναπτύσσονται κατά τόπους σημαντικές καρστικές υδρογεωλογικές ενότητες, που σήμερα αποδίδουν μεγάλες ποσότητες νερού. Οι ενότητες αυτές αναπτύσσονται στους ανθρακικούς σχηματισμούς των γεωτεκτονικών ζωνών υπερπινδική, πελαγονική και υποπελαγονική.

Οι κυριότερες καρστικές ενότητες είναι:

- Καρστική ενότητα Κόζιακα. Αναπτύσσεται σε λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους έκτασης περί τα 200 km². Εκφορτίζεται μέσω πηγών που τοποθετούνται στο ανατολικό τμήμα της ενότητας, προς τη Θεσσαλική πεδιάδα, κυριότερες από τις οποίες είναι της Γκούρας και του Ξυνοπάροικου, μέσης παροχής 1 m³/s. Η συνολική μέση υπόγεια απορροή είναι περίπου 3-4 m³/s και εμφανίζεται στις κοίτες των ποταμών Πορταϊκού και Παμίσου.
- Καρστική ενότητα κρυσταλλικών ασβεστόλιθων κεντρικής Θεσσαλίας. Περιλαμβάνει τους καρστικούς σχηματισμούς Κουτσόχερου – Δαμασίου - Τυρνάβου και τα καρστικά τμήματα Βούλας και Κεραμιδιού. Έχει έκταση περί τα 400 km². Η κύρια καρστική ενότητα Τυρνάβου εκφορτίζεται από τις πηγές Μάτι Τυρνάβου και Αγίας Άννας προς βορρά και Αμυγδαλιάς προς τα στενά Καλαμακίου του Πηνειού. Οι μικρές καρστικές ενότητες εκφορτίζονται από τις πηγές Βούλας, Κλοκωτού, Κεραμιδιού και Μεταμόρφωσης. Η μέση παροχή των παραπάνω πηγών ανέρχεται σε 3,2 m³/s.
- Καρστική ενότητα Μαυροβουνίου-Πηλίου (Κάρλας). Περιλαμβάνει τα κράσπεδα της παλιάς λίμνης Κάρλας και αποτελείται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους. Έχει έκταση περί τα 350 km². Η καρστική ενότητα εκφορτίζεται προς το Αιγαίο Πέλαγος στα ανατολικά, με υποθαλάσσιες πηγές, και προς νότο μέσω της μεγάλης υφάλμυρης παράκτιας πηγής. Η συνολική μέση υπόγεια απορροή είναι περίπου 2-3 m³/s.
- Καρστική ενότητα Όσσας - Κάτω Ολύμπου. Περιλαμβάνει τους ασβεστόλιθους του τεκτονικού παραθύρου Όσσας και Ολύμπου. Έχει έκταση

περί τα 170 km^2 . Η καρστική ενότητα εκφορτίζεται κυρίως από τις πηγές των Τεμπών, που αναβλύζουν στις δύο κοίτες του ποταμού Πηνειού (πηγές Αφροδίτης, Αγίας Παρασκευής, Νυμφών κλπ.). Ένα μέρος του Κάτω Ολύμπου εκφορτίζεται προς τα βόρεια στο πεδινό παράκτιο τμήμα της Κατερίνης. Οι μετρήσεις των κύριων πηγών των Τεμπών δίνουν μέση τιμή $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Καρστική ενότητα νότιων ασβεστολιθικών εμφανίσεων πεδιάδας Θεσσαλίας. Περιλαμβάνει επιμέρους μικρές καρστικές ενότητες, που εκφορτίζονται μέσω μικρών πηγών στην περίμετρο τους. Εδώ συναντώνται οι μικρές καρστικές μάζες Φαρσάλων, Κρατών, Ορφανών, Εκκάρας - Βελεσιωτών, Μύρων και Βελεστίνου. Η έκταση των ανθρακικών αυτών εμφανίσεων είναι περί τα 280 km^2 .
- Καρστικό σύστημα βόρειας Όθρυος. Περιλαμβάνει τις βόρειες απολήξεις του ομώνυμου βουνού. Οι νότιες απολήξεις εκφορτίζονται στο Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας, στην περιοχή Λαμίας και Στυλίδας. Ένα μικρό τμήμα ανθρακικών εμφανίσεων της βόρειας Όθρυος, που ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας, πρέπει να εκφορτίζεται εκτός διαμερίσματος προς νότο. Η έκταση του καρστικού συστήματος είναι $260\text{-}300 \text{ km}^2$. Η εκφόρτιση του συστήματος, εκτός του τμήματος που κινείται προς τα νότια, γίνεται μέσω μικρών πηγών στα βόρεια και ανατολικά (πλατάνου, Σούρπης, Αγίας Τριάδας). Οι πηγές Πλατάνου και Σούρπης είναι υφάλμυρες. Στον Όρμο της Σούρπης εξέρχονται επίσης υποθαλάσσιες πηγές.
- Καρστικό σύστημα Πίνδου. Περιλαμβάνει το τμήμα του όρους Όλυμπος που ανήκει στη Θεσσαλία και έχει έκταση περί τα $70\text{-}80 \text{ km}^2$. Η εκφόρτιση του πραγματοποιείται προς τα βορειοανατολικά στην πεδιάδα της Κατερίνης.
- Καρστικό σύστημα Πίνδου. Περιλαμβάνει τους λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους της Πίνδου στην περιοχή Τρικάλων που ανήκουν στο διαμέρισμα. Η έκταση της εμφάνισης εντός του διαμερίσματος είναι $75\text{-}80 \text{ km}^2$. Η κύρια εκφόρτιση του συστήματος γίνεται προς νότο και δυσμάς, εκτός του διαμερίσματος, ενώ ένα τμήμα προς τα ανατολικά εκφορτίζεται μέσω μικρών πηγών εντός της κοίτης των ρεμάτων του Πηνειού.

Από τις υδρογεωλογικές ενότητες της Θεσσαλίας, οι ποσότητες που μπορούν

να αντληθούν έχουν υπολογιστεί σε 450 εκατομμύρια κυβικά ετησίως. Από αυτά, τα 390 εκατομμύρια κυβικά θεωρούνται ότι ανήκουν στο πρακτικά εκμεταλλεύσιμο υπόγειο δυναμικό. Η μείωση αυτή οφείλεται στον συνυπολογισμό και άλλων παραγόντων όπως συνεκτίμηση του κόστους άντλησης, προστασίας υπογείων υδροφορέων από υφαλμύρυνση, προστασία περιοχών προοριζομένων για υδρεύσεις και αντικατάσταση υπογείων υδάτων από επιφανειακά [Μαρίνος κ.ά., 1995 σελ Κ7-49].

2.4.3 ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΔΑΤΩΝ

Για την εκτίμηση της σημερινής ποιοτικής κατάστασης των επιφανειακών υδάτινων σωμάτων του υδατικού διαμερίσματος μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μετρήσεις ποιοτικών χαρακτηριστικών που έχουν πραγματοποιηθεί από το Υπουργείο Γεωργίας για τους ποταμούς Πηνειό και Λιθαίο (1980–1997 και 1998–2001) και για τη λίμνη Πλαστήρα (1980–1997) και από το ΕΚΘΕ για τους ποταμούς Τιταρήσιο, Σκαμνιά και Ενιπέα. Σημαντικά είναι επίσης τα στοιχεία του ΥΠΕΧΩΔΕ για την περίοδο 2004–2005, που αναφέρονται στους ποταμούς Πηνειό, Λιθαίο, Τιταρήσιο και Ενιπέα καθώς και οι μετρήσεις μικροοργανικών και μετάλλων του Πανεπιστημίου Αιγαίου για τη περίοδο 1998–1999 στον Πηνειό.

Από την αξιολόγηση των ανωτέρω στοιχείων προκύπτει ότι ο Πηνειός έχει χαρακτηριστικά που ικανοποιούν κατ' αρχήν βασικά αγρονομικά κριτήρια για άρδευση γεωργικών εκτάσεων. Επιπρόσθετα, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ποταμού καλύπτουν τις προϋποθέσεις της κατηγορίας Α2 της Οδηγίας 75/440/ΕΟΚ για τα επιφανειακά ύδατα που είναι κατάλληλα για πρόσληψη νερού για ύδρευση μετά από επεξεργασία. Ωστόσο πρέπει να γίνουν οι παρακάτω επισημάνσεις:

- Σε όλες τις θέσεις δειγματοληψίας έχουν καταγραφεί σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών που περιστασιακά παραβιάζουν την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της Οδηγίας 75/440/ΕΟΚ (50 mg/L NO₃). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι την περίοδο 1980–1997 στη θέση του υδατόπυργου Δ. Λαρίσης έχει καταγραφεί συγκέντρωση νιτρικών της τάξης των 53.51 mg/L, ενώ αντίστοιχες τιμές έχουν καταγραφεί στις θέσεις γέφυρας Τρικάλων – Καρδίτσας (32.78 mg/L NO₃) και γέφυρας Εφέντη – Κεραμίδι (27.64 mg/L NO₃). Πιο πρόσφατα στοιχεία του Υπουργείου Γεωργίας για την περίοδο 1998–2001 στον υδατόπυργο Δ. Λαρίσης

καταδεικνύουν τιμές νιτρικών της τάξης των 54 mg/L NO₃, με τη μέγιστη τιμή του 95% των τιμών (48.6 mg/L σε σύνολο 23 μετρήσεων) να βρίσκεται οριακά κάτω από την επιτακτική τιμή της Οδηγίας για την παραγωγή πόσιμου νερού (50 mg/L NO₃). Οι σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών παρατηρούνται κυρίως κατά τους θερινούς μήνες και εκτιμάται ότι οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην απορροή από τις εκτεταμένες καλλιεργούμενες εκτάσεις της λεκάνης του ποταμού και των παραποτάμων του. Στις υπόλοιπες θέσεις δειγματοληψίας, σύμφωνα με στοιχεία του ΥΠΕΧΩΔΕ, έχουν καταγραφεί την περίοδο 2000–2003 τιμές νιτρικών της τάξης των 15 mg/L που δεν υπερβαίνουν όμως τα συνιστώμενα όρια της Οδηγίας για την κατηγορία Α1.

- Τόσο ο Πηνειός όσο και οι παραπόταμοί του αποτελούν τον αποδέκτη των αστικών λυμάτων αξιόλογων οικιστικών περιοχών (ο Πηνειός είναι άμεσος αποδέκτης λυμάτων της Λάρισας, ο Καλέτζης της Καρδίτσας, ο Ληθαίος των Τρικάλων, ο Ενιπέας των Φαρσάλων, ο Σοφαδίτης των Σποράδων και ο Τιταρήσιος του Τυρνάβου και της Ελασσόνας). Παρά το γεγονός αυτό τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη ρύπανση από λύματα (του αμμωνιακού αζώτου, κολοβακτηρίδια) είναι ικανοποιητικά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η συγκέντρωση αμμωνιακών (μέγιστη τιμή του 95% των μετρημένων δειγμάτων) αν και είναι υψηλότερη από την συνιστώμενη για την κατηγορία Α1 τιμή (0.05 mg/L NH₄), σε καμία περίπτωση δεν υπερβαίνει την ενδεικτική τιμή για την κατηγορία Α2 (1.0 mg/L NH₄). Αυτό κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στην επιτυχημένη λειτουργία των εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων των κυριοτέρων πόλεων της περιοχής (Λάρισα, Τρίκαλα, Καρδίτσα). Εξάιρεση αποτελεί η θέση Κουλούρι όπου εκτός από τις υψηλές τιμές νιτρικών (29.6 mg/L NO₃) έχουν επίσης καταγραφεί πολύ υψηλές τιμές αμμωνίου (9.04mg/L NH₄) και φωσφορικών (11.43 mg/L P₂O₅).

- Ο Πηνειός παρουσιάζει σχετικά επιβαρημένη εικόνα ως προς τη συγκέντρωση ορισμένων βαρέων μετάλλων όπως το χρώμιο, το νικέλιο και ο χαλκός, τα οποία έχουν μετρηθεί σε συγκεντρώσεις που παραβιάζουν τις οριακές τιμές ποιότητας των υδάτων που καθορίζονται από την Πράξη Υπουργικού Συμβουλίου υπ' αριθμόν 2/1-2-2001. Σε συγκεντρώσεις που υπερβαίνουν τις ενδεικτικές τιμές ποιότητας των υδάτων έχουν μετρηθεί επίσης τα μέταλλα μαγγάνιο και αργίλιο. Σε σχέση με τις οριακές τιμές που καθορίζονται στην Οδηγία 75/440/ΕΟΚ για ορισμένα από τα παραπάνω μέταλλα, ο χαλκός κυμαίνεται στο επίπεδο τιμών της κατηγορίας Α2 (η

μέγιστη τιμή του 95% των δειγμάτων είναι υψηλότερη από την επιτακτική τιμή των 50 µg/L που καθορίζεται για τη κατηγορία A1), ενώ κρίσιμος παράγοντας για την υδατοποιότητα του ποταμού είναι και το χρώμιο το οποίο έχει μετρηθεί σε συγκεντρώσεις (79µg/L, 137µg/L) που παραβιάζουν την επιτακτική τιμή των 50µg/L. Επισημαίνεται το χαμηλό επίπεδο μικροοργανικών που για τις περισσότερες από τις εξεταζόμενες ουσίες βρίσκεται σε πρακτικά μη ανιχνεύσιμα επίπεδα και για καμία δεν υπερβαίνει τις οριακές τιμές ποιότητας των υδάτων που καθορίζονται από την ελληνική νομοθεσία.

Στη λίμνη Πλαστήρα δεν παρατηρείται παραβίαση των μέγιστων επιτρεπόμενων συγκεντρώσεων για τις διάφορες χρήσεις (πρόσληψη νερού για ύδρευση μετά από επεξεργασία, άρδευση, διαβίωση ψαριών). Οι συγκεντρώσεις θρεπτικών (NO₃, NH₄, P) που έχουν μετρηθεί κυμαίνονται στα επίπεδα τιμών που προδιαγράφονται για τα υδάτινα σώματα κατηγορίας A1 (Οδηγία 75/440/ΕΟΚ). Ως προς τη τροφική κατάσταση η λίμνη δε φαίνεται να αντιμετωπίζει πρόβλημα ευτροφισμού. Τόσο οι συγκεντρώσεις φωσφόρου και αζώτου όσο και το ποσοστό κορεσμού κυμαίνονται σε επίπεδα τα οποία δεν συνιστούν πρόβλημα ευτροφισμού.

Επισημαίνεται ότι τα συμπεράσματα για την ποιοτική κατάσταση των επιφανειακών υδάτων του διαμερίσματος βασίζονται σε ιδιαίτερα ελλιπή δεδομένα τα οποία θα πρέπει να εμπλουτισθούν με ένα πιο συστηματικό πρόγραμμα δειγματοληψιών και αναλύσεων. Θα πρέπει επιπλέον να επισημανθεί η ανάγκη συμπλήρωσης του προγράμματος δειγματοληψιών και αναλύσεων προκειμένου να συμπεριληφθούν σε αυτό κρίσιμες παράμετροι όπως θρεπτικά (NO₃, NH₄, Ολικό-P) και βαρέα μέταλλα για να καταστεί δυνατή η πληρέστερη και ακριβέστερη εκτίμηση της υδατοποιότητας των ποταμών. («Μελέτη για το εθνικό πρόγραμμα διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων», 2008, ΥΠΕΧΩΔΕ - ΕΜΠ)

2.5 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που εντοπίζεται στο Υδατικό Διαμέρισμα Θεσσαλίας είναι η κάλυψη της αρδευτικής ζήτησης κατά τους μήνες Ιούνιο, Ιούλιο

και Αύγουστο, κατά τους οποίους οι ανάγκες των καλλιεργειών είναι υψηλές και οι διατιθέμενες ποσότητες μειωμένες. Ακόμα, οι απαιτούμενες ποσότητες είναι πολύ μεγάλες σε σχέση με παλαιότερες δεκαετίες, κυρίως λόγω της μεταστροφής προς τις πιο προσοδοφόρες αλλά και εξαιρετικά απαιτητικές σε νερό καλλιέργειες (π.χ. βαμβάκι).

2.5.1 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΝΕΡΑ

Κατά τους μήνες Μάιο έως Σεπτέμβριο, οι παροχές των ποταμών μειώνονται δραματικά σε σχέση με τις χειμερινές. Μεγάλες ποσότητες ύδατος έχουν κατεισδύσει στον υπόγειο υδροφόρα ενώ, το μεγαλύτερο μέρος έχει καταλήξει στη θάλασσα στις εκβολές του Πηνειού. Τα λιγιστά εναπομείναντα νερά των παραποτάμων του Πηνειού αλλά και των αρδευτικών δικτύων, περιορίζονται από μικρά προσωρινά φράγματα στις κοίτες, που έχουν ως στόχο τη συγκέντρωση των υδάτων για την άρδευση των καλλιεργειών. Αυτό δηλώνει και το μεγαλύτερο πρόβλημα της περιοχής. Ενώ υπάρχουν αξιόλογες ποσότητες υδάτων κατά τους χειμερινούς μήνες, μένουν ανεκμετάλλευτες με αποτέλεσμα το καλοκαίρι που υπάρχουν μεγάλες ανάγκες σε νερό από τις καλλιέργειες, να μην υπάρχει κάλυψη της ζήτησης. Χαρακτηριστικό είναι το ότι σε όλο το Υδατικό Διαμέρισμα της Θεσσαλίας συμπεριλαμβανομένης και της Μαγνησίας, συνολικά διατίθενται, θεωρητικά, καθ' όλο το χρόνο $3.139,8 \text{ hm}^3$ (συμπεριλαμβανομένων των υπογείων νερών)[ΥΒΕΤ, 1996].

Το πρακτικώς εκμεταλλεύσιμο υδατικό δυναμικό (με την κατασκευή όλων των ταμιευτήρων, που δεν θα δημιουργήσουν σοβαρά περιβαλλοντικά ή τεχνικά προβλήματα), είναι της τάξης των 623 hm^3 ετησίως για το σύνολο της Θεσσαλίας. Εάν σε αυτά προστεθούν και 400 hm^3 που είναι η ποσότητα του υπόγειου νερού που μπορεί να αντληθεί με ασφάλεια ετησίως, τότε διατίθενται συνολικά 1.023 hm^3 . Δεδομένου ότι οι ετήσιες ανάγκες σε νερό υπολογίζονται σε 1.836 hm^3 , τότε προκύπτει ένα έλλειμμα της τάξης των 813 hm^3 . (Ημερίδα «Υδατικοί πόροι και γεωργία», 2008, Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση, «Οι αρδεύσεις στη θεσσαλική πεδιάδα: επιπτώσεις στα επιφανειακά και υπόγεια νερά», Κ. Γκούμα).

Από τα υδατικά ισοζύγια και άλλων μελετών που έγιναν πρόσφατα

(Περιφέρεια Θεσσαλίας, 2005), φαίνεται ότι το έλλειμμα μόνο στη λεκάνη του Πηγείου, με συντηρητικές εκτιμήσεις, κυμαίνεται μεταξύ 750 και 1000 hm³.

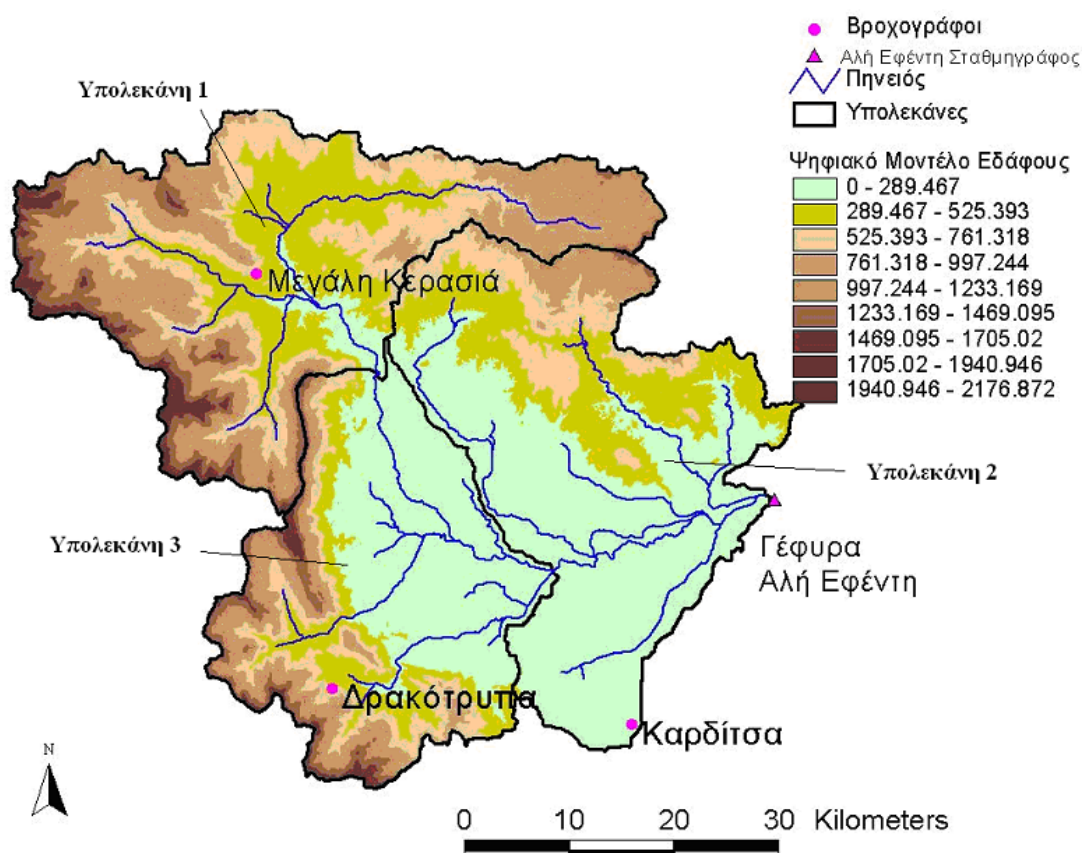
2.5.2 ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

Διαφορετικής φύσης είναι το πρόβλημα της επάρκειας των υπογείων υδάτων αλλά με μεγάλη αλληλεπίδραση με το πρόβλημα των επιφανειακών υδάτων. Η Θεσσαλική είναι εξαιρετικά εκτεταμένη. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλές περιοχές να απέχουν μεγάλες αποστάσεις από κλάδους ποταμών με καλοκαιρινή παροχή. Κατά συνέπεια, οι γεωργοί των περιοχών αυτών στρέφονται στον υδροφόρο ορίζοντα με αντλήσεις. Αλλά το γεγονός αυτό από μόνο του δεν αποτελεί απειλή για τα αποθέματα του υπόγειου υδροφορέα. Τα προβλήματα είναι κυρίως δύο: η μεγάλη έκταση των αρδευόμενων από υπόγεια νερά καλλιεργειών και η υπεράντληση. Εξαιτίας της υπεράντλησης, δηλαδή της εξάντλησης των ανανεώσιμων (ρυθμιστικών) αποθεμάτων των υδροφορέων, παρατηρείται δραματική ταπείνωση της στάθμης, που σε ορισμένες περιοχές έχει φτάσει μέχρι και τα 100 m, σε διάστημα 30 ετών, δημιουργώντας κίνδυνο ερημοποίησης.

2.6 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης που επιλέξαμε, συνολικής έκτασης 2881,96 km², βρίσκεται στο δυτικό τμήμα του υδατικού διαμερίσματος. Δυτικά και βόρεια, τα όρια της περιοχής συμπίπτουν με τα όρια του διαμερίσματος, ανατολικά εκτείνεται έως την γέφυρα του Αλή Εφέντη ενώ νότια έως την πόλη της Καρδίτσας. Η εικόνα 2.5 αποτελεί το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής στο οποίο διακρίνονται τα όρια αυτής καθώς και τα όρια των τριών υπολεκανών της. Επίσης έχουν σημειωθεί οι βροχογράφοι της Μεγάλης Κερασιάς, της Δρακότρυπας και της Καρδίτσας όπως και ο σταθμηγραφικός σταθμός στη γέφυρα του Αλή Εφέντη, στοιχεία των οποίων χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στον πίνακα 2-1 παρατίθενται όλα τα επιμέρους στοιχεία της λεκάνης τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην πορεία της εργασίας κατά την επεξεργασία των μαθηματικών μοντέλων στο πρόγραμμα. Αυτά είναι: η επιφάνεια (Α) των τριών υπολεκανών και η μέση κλίση (S) κάθε μιας καθώς

επίσης και το μήκος (L) των υδατορευμάτων.

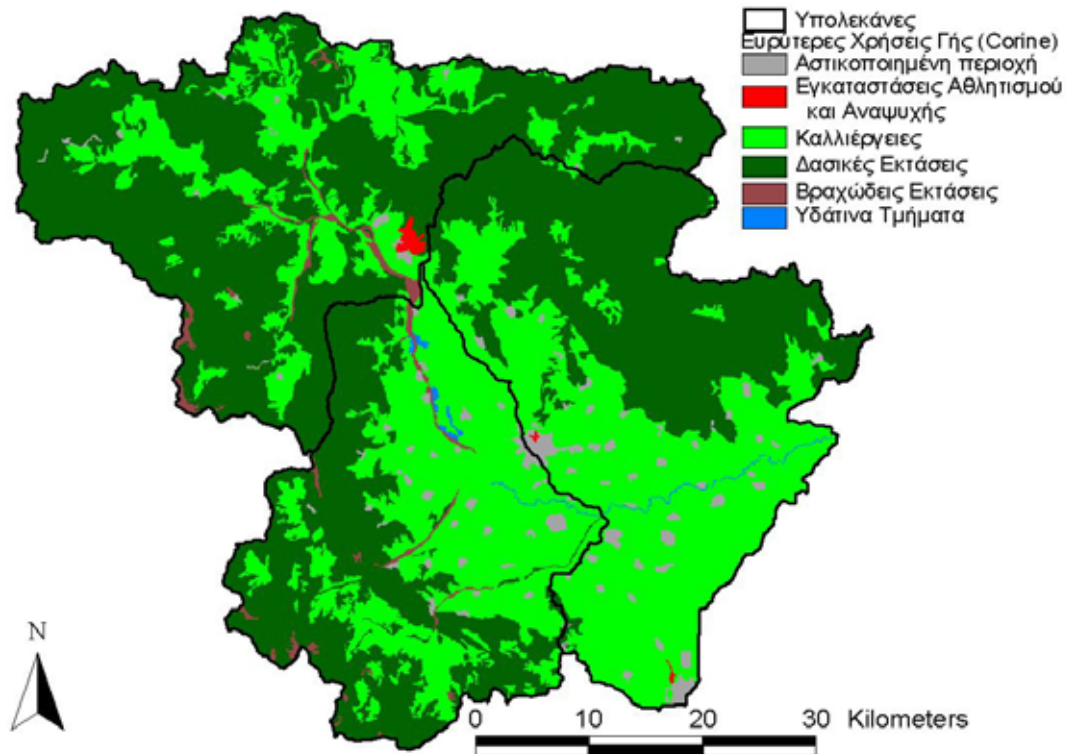


Εικόνα 2.5 : Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης.

	A (km ²)	S (μέση κλίση)	L (km)
Υπολεκάνη 1 (η ανάντη υπολεκάνη)	1058.73	12.99	—
Υπολεκάνη 2 (η κατάντη υπολεκάνη)	1021.33	5.69	—
Υπολεκάνη 3 (η μεσαία υπολεκάνη)	801.9	11.18	—
Υδατόρευμα υπολεκάνης 1	—	—	25.2
Υδατόρευμα υπολεκάνης 2 (γέφυρα Μεσδανίου-γέφυρα Αλή Εφέντη)	—	—	26.5
Υδατόρευμα υπολεκάνης 3 (γέφυρα Σαρακήνας-γέφυρα Μεσδανίου)	—	—	30.5

Πίνακας 2-1 : Χαρακτηριστικά μεγέθη της λεκάνης απορροής

Όπως είναι γνωστό, στο το υδατικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, οι χρήσεις γης που κυριαρχούν είναι οι καλλιέργειες. Αυτό μπορούμε να το εντοπίσουμε και στην περιοχή μελέτης από την παρακάτω εικόνα 2.6 όπου αποτελεί τον χάρτη ευρύτερων χρήσεων γης (Arcview – στο παράρτημα Α παραθέτουμε και τον αναλυτικό χάρτη χρήσεων γης της περιοχής).



Εικόνα 2.6 : Χάρτης ευρύτερων χρήσεων γης

3 : ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ – Σ.Γ.Π – ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC - HMS

3.1 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

3.1.1 ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Για την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών μιας λεκάνης απορροής έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα μαθηματικών μοντέλων, τα οποία, χρησιμοποιώντας δεδομένα από επεξεργασία μετρήσεων πεδίου και ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με την μαθηματική αναπαράσταση των διεργασιών της λεκάνης, εκτιμούν τη διάταξή της σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες. Τα εν λόγω μοντέλα συμβάλλουν στην κατανόηση των μηχανισμών που σχετίζονται με τον κύκλο του νερού. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ως μοντέλα πρόγνωσης της εξέλιξης των υδρολογικών μεγεθών μιας λεκάνης, εφόσον είναι γνωστές οι αρχικές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου (Beven, 1989). Κατά κανόνα, το πεδίο εφαρμογής των μοντέλων προσομοίωσης είναι είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Η ανάπτυξη ξεχωριστών μοντέλων για κάθε πεδίο επιβάλλεται λόγω των διαφορετικών αναγκών αλλά και λόγω της διαφορετικής χωροχρονικής κλίμακας εξέλιξης των διεργασιών.

Η πρώτη περίπτωση αναφέρεται, συνήθως, σε σχήματα υδατικού ισοζυγίου, που δίνουν μια συνολική αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου σε μια συγκεκριμένη χωρική ενότητα (που είναι είτε η ενιαία λεκάνη είτε διακριτά τμήματα αυτής), περιγράφοντας τον μετασχηματισμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή. Η απορροή της λεκάνης είναι η κύρια έξοδος του μοντέλου, αλλά και η μεταβλητή εκείνη με την οποία ελέγχεται η προσαρμογή του. Η υπόγεια (βασική) ροή θεωρείται συνιστώσα της συνολικής απορροής, και συνήθως εκτιμάται συγκεντρωτικά, με βάση απλοποιημένες παραδοχές (π.χ. θεωρώντας τον υδροφορέα ως γραμμικό ταμιευτήρα, η εκφόρτιση του οποίου τροφοδοτεί την υπόγεια απορροή).

Στην δεύτερη περίπτωση, προσομοιώνεται ο μηχανισμός κίνησης του υπόγειου νερού, με την χωρική (ή και χρονική) διακριτότητα της προσομοίωσης να

είναι, ως επί το πλείστον, πολύ πιο λεπτομερής σε σχέση με τα μοντέλα επιφανειακής υδρολογίας. Ωστόσο, αν και η περίπτωση συνδυασμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων διεργασιών είναι λιγότερο συχνή, αυτή θεωρείται επιβεβλημένη όταν υπάρχουν συνδυασμένες χρήσεις νερού και σημαντική συνεισφορά του υπόγειου δυναμικού στην συνολική απορροή της λεκάνης.

3.1.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΟΜΗ

Τα υδρολογικά μοντέλα, ανάλογα με τη μαθηματική δομή τους, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- εννοιολογικά (conceptual) μοντέλα
- κατανεμημένα μοντέλα φυσικής βάσης

Στην πρώτη εντάσσονται τα εννοιολογικά (conceptual) μοντέλα (συγκεντρωτικά ή ημικατανεμημένα), τα οποία αναπαριστούν τις κύριες υδρολογικές διεργασίες είτε της συνολικής λεκάνης ή των υπολεκανών της, θεωρώντας μια προκαθορισμένη μαθηματική δομή που βασίζεται σε εμπειρικές υποθέσεις. Το πλεονέκτημα των εννοιολογικών μοντέλων είναι η απλότητά τους, η οποία επιτρέπει την αναπαράσταση πολύπλοκων φυσικών διεργασιών που χαρακτηρίζονται από έντονη χωρική ανομοιογένεια, μέσω ενός μικρού σχετικά πλήθους παραμέτρων. Οι εν λόγω παράμετροι, αν και δεν έχουν ακριβή φυσική σημασία, μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές ορισμένων μέσων χαρακτηριστικών της λεκάνης.

Τα εννοιολογικά υδρολογικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες χρονικές διακριτότητες (ωριαία, ημερήσια, μηνιαία) και διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας, που κυμαίνονται από πολύπλοκα σχήματα με 10 έως 20 παραμέτρους, που είναι κατάλληλα για άνυδρες ή ημιάνυδρες λεκάνες, έως πολύ απλά σχήματα ελάχιστων παραμέτρων, που θεωρούνται επαρκή για λεκάνες με πλούσιο υδατικό δυναμικό (Alley 1984, Makhlof and Michel 1994, Ye et al. 1997, Xu and Singh 1998). Ανάλογα με τη χωρική διακριτότητα και τον τρόπο προσδιορισμού των παραμέτρων τους, τα εν λόγω σχήματα διακρίνονται σε (Ajami et al., 2004):

- Αδιαμέριστα (lumped): Θεωρείται μια ενιαία παραμετροποίηση για το σύνολο της λεκάνης, της οποίας αναπαρίστανται οι κύριες υδρολογικές διεργασίες, με σκοπό την εκτίμηση της απορροής στην έξοδο αυτής.

- Ημικατανεμημένα (semi-distributed): Η λεκάνη απορροής χωρίζεται σε διακριτές ενότητες, οι οποίες αντιστοιχούν είτε σε φυσικές υπολεκάνες είτε σε περιοχές με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούν διαφορετικά δεδομένα εισόδου (χρονοσειρές φόρτισης) και διαφορετικές τιμές παραμέτρων. Η απορροή κάθε ενότητας «μεταφέρεται» στην έξοδο της υπό μελέτη λεκάνης, κάτι που σε μικρή χρονική κλίμακα προϋποθέτει την εφαρμογή υπολογιστικών τεχνικών διόδευσης.

- Ημι-αδιαμέριστα (semi-lumped): Πρόκειται για μια ενδιάμεση σχηματοποίηση μεταξύ της συγκεντρωτικής και της ημικατανεμημένης, βάσει της οποίας θεωρούνται διακριτές ενότητες, κάθε μία από τις οποίες δέχεται διαφορετική φόρτιση, ωστόσο οι παράμετροι που εφαρμόζονται είναι κοινές για όλες τις ενότητες.

Στην δεύτερη κατηγορία εντάσσονται τα κατανεμημένα μοντέλα φυσικής βάσης που αναπαριστούν τις μικρές υδρολογικές διεργασίες βασιζόμενα στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού. Προφανώς, αυτό προϋποθέτει ότι η χωρική κατανομή των χαρακτηριστικών της λεκάνης (τοπογραφικών, εδαφολογικών, γεωλογικών, υδρογεωλογικών, κλπ.) είναι γνωστή.

Το πλεονέκτημα της παραπάνω προσέγγισης είναι η προσαρμογή σε λεκάνες χωρίς μετρήσεις καθώς και η δυνατότητα διερεύνησης σεναρίων αλλαγής των δεδομένων εισόδου, όπως σεναρία κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, η έντονη ετερογένεια των φυσικών διεργασιών επιβάλλει τη γνώση των εν λόγω χαρακτηριστικών σε εξαιρετικά λεπτομερή χωρική κλίμακα, κάτι που στην πράξη καθίσταται εξαιρετικά δύσκολο. Από την άλλη πλευρά, επειδή τα κατανεμημένα μοντέλα δύνανται να περιγράψουν πολύ καλύτερα τις φυσικές διεργασίες, αξιοποιώντας τη διαθέσιμη γεωγραφική πληροφορία, βρίσκουν πλέον όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή, με τη θεώρηση των πλέον σημαντικών δεδομένων εισόδου ως παραμέτρων, και την εκτίμησή τους, σε αντιστοιχία με τα εννοιολογικά μοντέλα, μέσω βελτιστοποίησης (Refsgaard 1997, Eckhardt and Arnold 2001).

Στην τελευταία κατηγορία μοντέλων εντάσσονται τα σχήματα τύπου μαύρου κουτιού (black-box), οι εξισώσεις των οποίων δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες τον υδρολογικού κύκλου, είτε σε μεγάλη είτε σε μικρή κλίμακα, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα, αντίστοιχα. Στα

σχήματα μαύρου κουτιού περιλαμβάνονται τα στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα που περιγράφουν γραμμικές (ή γραμμικοποιημένες) σχέσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων, καθώς και τα νευρωνικά δίκτυα που περιγράφουν έντονα μη γραμμικούς μετασχηματισμούς των εισόδων σε εξόδους. Ένα εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως κάτι ενδιάμεσο μεταξύ ενός νευρωνικού δικτύου και ενός φυσικής βάσης μοντέλου. Επισημαίνεται ότι οι παράμετροι των στατιστικών και στοχαστικών μοντέλων υπολογίζονται αναλυτικά, με βάση τα ιστορικά υδρολογικά δείγματα ή ορισμένα στατιστικά τους χαρακτηριστικά, ενώ οι παράμετροι των νευρωνικών δικτύων εκτιμώνται, όπως και στην περίπτωση των εννοιολογικών μοντέλων, μέσω βαθμονόμησης.

3.1.3 ΧΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΤΗΤΑ

Όσον αφορά στην χρονική διακριτότητα, αυτή είναι άμεσα εξαρτώμενη από τον σκοπό του μοντέλου. Σχήματα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για διαχειριστικούς σκοπούς υιοθετούν την μηνιαία ή, σπανιότερα, την ημερήσια κλίμακα, ενώ τα μοντέλα πλημμυρών χρησιμοποιούν μικρότερες κλίμακες, με μέγιστη την ημερήσια. Βεβαίως, η μικρή χρονική κλίμακα προσομοίωσης επιβάλλει αντίστοιχα μικρή διακριτότητα των υδρολογικών χρονοσειρών εισόδου, κάτι που προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλης μετρητικής υποδομής στη λεκάνη, από συνεχή καταγραφικά όργανα όπως βροχογράφους και σταθμηγράφους. Επισημαίνεται ότι στις μικρές χρονικές κλίμακες, η επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών υδρολογικών χρονοσειρών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, αφού τα δείγματα πρέπει να είναι κατάλληλα χρονισμένα, ώστε να αντιπροσωπεύουν πραγματικούς χρόνους υστέρησης.

3.2 ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Ως Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ - γνωστό ευρέως και ως G.I.S. Geographic Information Systems) αναφέρεται εκείνο το ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, αποθήκευσης, διαχείρισης και ανάλυσης πληροφορίας που έχει σχέση με φαινόμενα που εξελίσσονται στο γεωγραφικό χώρο.

Το ΣΓΠ είναι οργανωμένη συλλογή εξοπλισμού, λογισμικού, γεωγραφικών δεδομένων και προσωπικού, σχεδιασμένη έτσι ώστε να συγκεντρώνει, αποθηκεύει, ενημερώνει, επεξεργάζεται, αναλύει και παρουσιάζει όλους τους τύπους των γεωγραφικών δεδομένων. Συνδέει τις γεωγραφικές τοποθεσίες με πληροφορία (οντότητες χαρτών), παράγοντας θεματικούς χάρτες (με περιγραφικά δεδομένα) και έτσι την οπτικοποιεί και βοηθά στην ανάλυση της.

Αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα χρήσιμο για τη διαδικασία λήψης αποφάσεων, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται από πολλούς θεσμικούς φορείς τα τελευταία χρόνια. Η οπτικοποίηση της πληροφορίας που διαθέτει, επιτυγχάνεται με την παραγωγή από αυτό διαγραμμάτων, χαρτών, πινάκων και αναφορών. Σε πιο γενική μορφή, είναι ένα εργαλείο "έξυπνου χάρτη" το οποίο επιτρέπει στους χρήστες του να δημιουργήσουν διαδραστικά ερωτήσεις (αναζητήσεις δημιουργούμενες από τον χρήστη), να αναλύσουν τα χωρικά δεδομένα (spatial data) και να τα προσαρμόσουν.

3.2.1 ARCVIEW

Το ArcView ως πρόγραμμα ανήκει στα Συστήματα Γεωγραφικής Πληροφορίας και είναι κατάλληλο για την οπτικοποίηση, διαχείριση, αναζήτηση, δημιουργία και ανάλυση γεωγραφικών δεδομένων. Είναι ένα ισχυρό και απαραίτητο εργαλείο για την πλήρη κατανόηση του περιεχομένου της γεωγραφικής πληροφορίας. Κύρια χαρακτηριστικά του προγράμματος είναι τα εξής:

- Δημιουργία χαρτών και αλληλεπίδραση – συσχέτιση με τα δεδομένα μας με την παραγωγή αναφορών και διαγραμμάτων καθώς και με την χρήση των χαρτών αυτών σε άλλες εφαρμογές
- Επιλογή σταθερών μοτίβων στην δημιουργία και παρουσίαση των χαρτών
- Δημιουργία μοντέλων ροής εργασιών και σενάρια για την οπτικοποίηση και την ανάλυση των δεδομένων
- Δυνατότητα εισαγωγής, επεξεργασίας και διαχείρισης πολυάριθμων τύπων δεδομένων
- Δυνατότητα εργασίας με εργαλεία τα οποία έχουν την ικανότητα να εμφανίζουν και να αναλύουν ένα μεγαλύτερο εύρος πληροφοριών κάτι που δεν μπορεί να γίνει στους στατικούς δισδιάστατους χάρτες.

- Όλα τα αποτελέσματα που παράγονται από το πρόγραμμα ArcView μπορούν να εκτυπωθούν

3.2.2 HEC - GEOHMS

Για τον σχηματισμό της λεκάνης απορροής και όλων των στοιχείων που υπεισέρχονται σ αυτή, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα HEC – GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modelling System). Είναι ένα εργαλείο Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών που αξιοποιεί τοπογραφικά δεδομένα και γεωμετρικούς αλγόριθμους για την επίτευξη του σκοπού αυτού. Ουσιαστικά αποτελεί ένα πρόγραμμα σύνδεσης και μετάφρασης των αρχείων του ArcView ώστε να μπορούν να εισαχθούν στο υδρολογικό ομοίωμα HEC-HMS.

Κύρια χαρακτηριστικά και δυνατότητες του προγράμματος είναι τα παρακάτω:

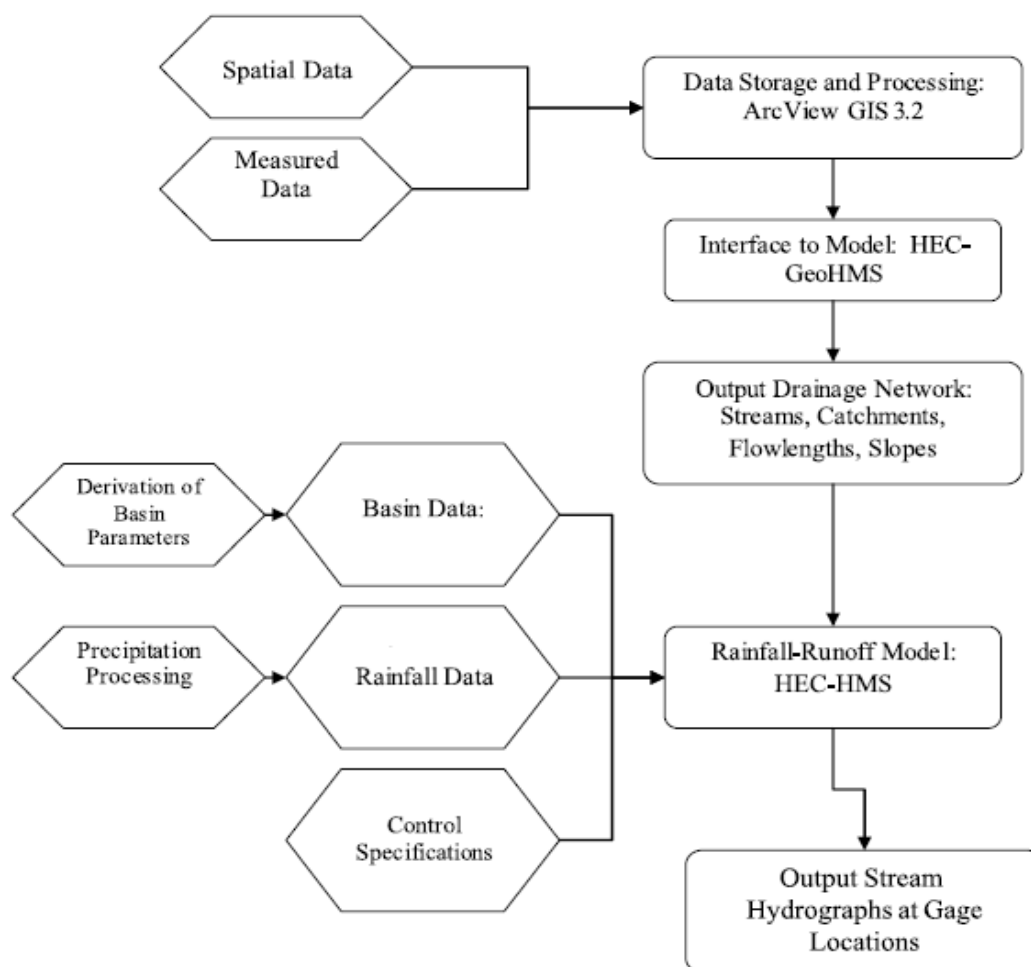
- Απολύτως συμβατό με το ArcView, που προετοιμάζει τα δεδομένα εισόδου για τη μοντελοποίηση με το HEC -HMS
- Ανάλυση Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους – Υπολογισμός γεωμετρικών στοιχείων λεκάνης (μήκη υδατορευμάτων, κλίσεις κλπ).
- Τα όρια της λεκάνης και ο σχηματισμός του υδρογραφικού δικτύου μετατρέπονται σε ένα σύστημα υδρολογικών δεδομένων που αναπαριστά την απόκριση της λεκάνης στη βροχόπτωση
- Παρέχει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας GIS με εργαλεία – κουμπιά menus
- Επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει τα σημεία μετρητικών σταθμών υδραυλικών κατασκευών ή άλλων σημείων ελέγχου
- Τα αποτελέσματα εισάγονται στο HEC-HMS για την τελική προσομοίωση.

3.2.3 SPATIAL ANALYST

Το Spatial Analyst είναι μια εφαρμογή η οποία προσθέτει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων για μοντελοποίηση του χώρου στο GIS ArcView. Η επέκταση αυτή του ArcView επιτρέπει τη δημιουργία, ανάλυση και χαρτογραφική απόδοση raster δεδομένων (σημεία, γραμμές, πολύγωνα) και την υλοποίηση ολοκληρωμένης raster – vector ανάλυσης. Κύρια χαρακτηριστικά του προγράμματος είναι τα εξής:

- Μετατροπή vector δεδομένων (διανυσματικά δεδομένα) σε grid (πλέγμα) δεδομένα.
- Δημιουργία ζωνών με βάση την απόσταση ή την εγγύτητα από χωρικές οντότητες ή θεματικές πληροφορίες
- Δημιουργία χαρτών πυκνότητας από σημειακή θεματική πληροφορία.
- Δημιουργία συνεχών επιφανειών από δεδομένα διασπαρμένων σημείων.
- Παραγωγή χαρτών ισούψων, κλίσης, έκθεσης και σκίασης αναγλύφου από αυτές της επιφάνειες.
- Υλοποίηση cell-based map analysis (ανάλυση χάρτη βασιζόμενη σε κελιά) .
- Εκτέλεση αλγεβρικών υπολογισμών σε πολλαπλά θέματα (πάνω σε grid δεδομένα)
- Υλοποίηση neighborhood και zone ανάλυσης.
- Κατηγοριοποίηση και παρουσίαση δεδομένων.

Στο διάγραμμα 3.1 απεικονίζεται σε ένα διάγραμμα ροής η αλληλεπίδραση του Σ.Γ.Π ArcView με τις προεκτάσεις του, HEC – GeoHMS και Spatial Analyst και η αλληλουχία χρησιμοποίησής τους. Τα αποτελέσματα τα οποία παράγονται και εισάγονται στο πρόγραμμα HEC - HMS είναι το αρχείο χάρτη (background map file) και το αρχείο της λεκάνης απορροής (basin model file) το οποίο μπορεί να είναι ενιαίο ή κατανεμημένο. Το αρχείο χάρτη είναι μια σχηματική αναπαράσταση των υπολεκανών και των υδατορευμάτων της λεκάνης απορροής και των σχέσεων μεταξύ τους. Το αρχείο λεκάνης περιέχει όλα τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία για τις υπολεκάνες και τα υδατορεύματα



Διάγραμμα 3-1: Συμμετοχή ArcView, HEC – GeoHMS και Spatial Analyst στην διαδικασία προσομοίωσης πλημμυρικού γεγονότος με χρήση του υδρολογικού μοιώματος HEC-HMS (αναπαραγωγή από M.R. Knebl et al, 2005)

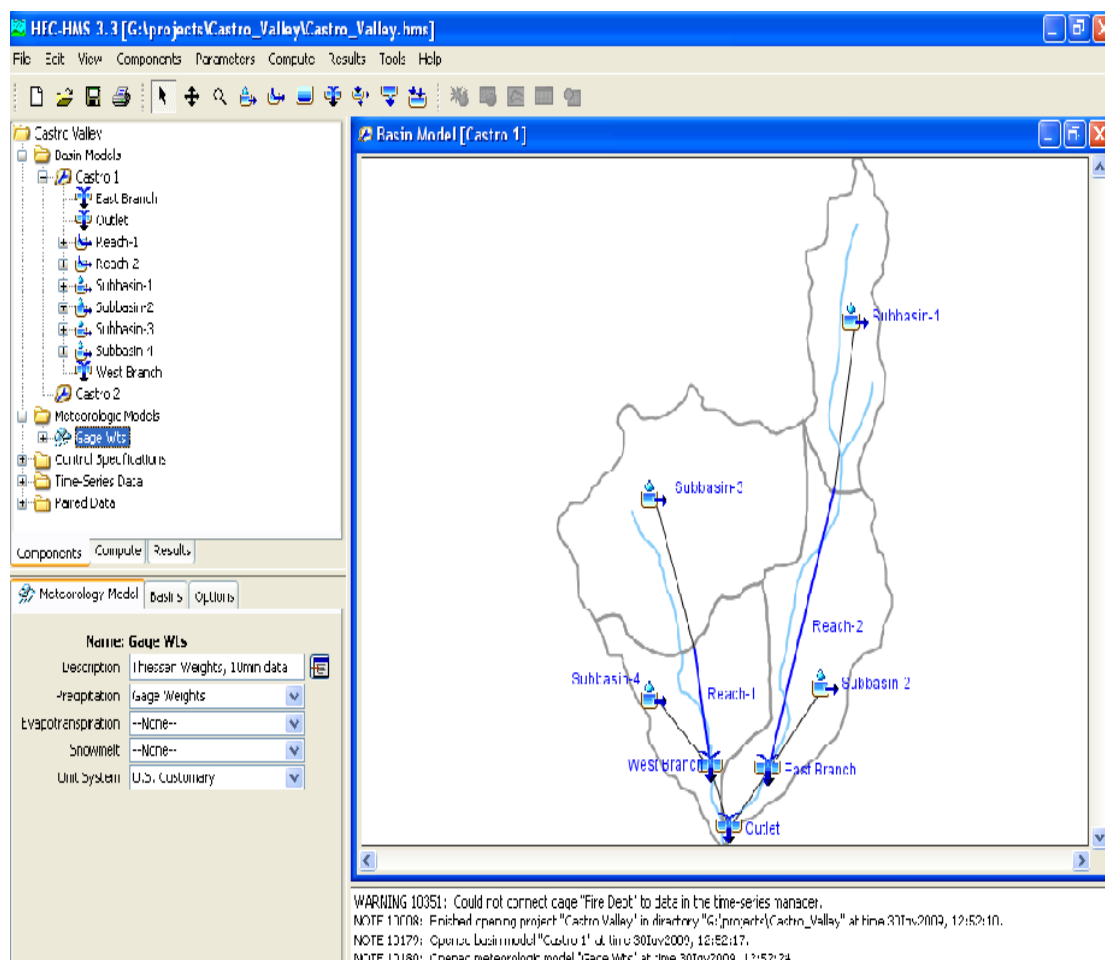
3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ HEC - HMS

Το HEC - HMS είναι από τα πλέον καταξιωμένα υδρολογικά μοντέλα και έχει βρει εφαρμογή σε πληθώρα μελετών πλημμυρών παγκοσμίως. Αναπτύχθηκε από τον Οργανισμό του Ειδικού Σώματος Μηχανικών του Στρατού που υπάγεται στο Ινστιτούτο Υδατικών Πόρων των ΗΠΑ και αποτελεί εξέλιξη του HEC1. Μπορεί να είναι είτε συγκεντρωτικό είτε καταναμημένο μοντέλο, μεμονωμένου υδρολογικού γεγονότος ή συνεχές και εννοιολογικό.

Το υδρολογικό αυτό μοντέλο έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να προσομοιώνει τις διαδικασίες βροχής - απορροής σε λεκάνες απορροής δενδριτικού τύπου. Είναι εφαρμόσιμο σε ένα μεγάλο εύρος περιοχών, τόσο σε μεγάλες αγροτικές λεκάνες όσο και σε μικρές αστικές ή ημιαστικές, επιλύοντας το μεγαλύτερο μέρος των προβλημάτων τα οποία παρουσιάζονται εκεί όπως οι μεγάλες παροχές νερού λεκανών ποταμών, η υδρολογία πλημμυρών και η μικρή αστική ή φυσική απορροή. Το μοναδιαίο υδρογράφημα που παράγεται από το πρόγραμμα, χρησιμοποιείται, άμεσα ή από κοινού με άλλο λογισμικό, σε μελέτες που αφορούν στη διαθεσιμότητα υδάτων, στην πρόγνωση πλημμυρών, στις συνέπειες μελλοντικής αστικοποίησης λεκανών απορροής, στον σχεδιασμό υπερχειλιστών φραγμάτων, στο σχεδιασμό αντιμετώπισης καταστροφών από πλημμύρες, στη διευθέτηση περιοχής κατάκλυσης πλημμύρας και στη διαχείριση συστημάτων.

Το πρόγραμμα είναι ένα γενικευμένο σύστημα μοντελοποίησης ικανό να αναπαριστάει πολλές διαφορετικές λεκάνες απορροής. Ένα μοντέλο λεκάνης δημιουργείται με το χωρισμό του υδρολογικού κύκλου σε εύχρηστα κομμάτια - συνιστώσες και την οριοθέτηση της υπό μελέτη λεκάνης. Οποιαδήποτε από τις συνιστώσες αυτές του κύκλου μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα μαθηματικό μοντέλο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, διάφορες επιλογές μοντέλων είναι διαθέσιμες για την προσομοίωση κάθε συνιστώσας. Κάθε μαθηματικό μοντέλο που περιλαμβάνεται στο πρόγραμμα είναι κατάλληλο για διαφορετικό περιβάλλον και για διαφορετικές συνθήκες. Για να καταλήξουμε στη σωστή επιλογή απαιτείται καλή γνώση της λεκάνης και του σκοπού - στόχου της υδρολογικής μελέτης καθώς και η προσωπική κρίση και εμπειρία του χειριστή του προγράμματος.

Παρακάτω παραθέτουμε ένα δείγμα του πως είναι το περιβάλλον εργασίας του προγράμματος. Διακρίνονται τα 4 διαφορετικά επίπεδα εργασίας καθώς επίσης και η γραμμή βοηθητικών εργαλείων πάνω πάνω.



Εικόνα 3.1: Περιβάλλον εργασίας του HEC – HMS ενώ δουλεύουμε πάνω στο project Castro Valley το οποίο παρέχεται σαν παράδειγμα για εξάσκηση στο πρόγραμμα.

3.3.1 ΦΥΣΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ (WATERSHED PHYSICAL DESCRIPTION)

Καλούμαστε λοιπόν να επιλέξουμε ένα υπομοντέλο για κάθε μία από τις ακόλουθες συνιστώσες:

- υπομοντέλο εκτίμησης υδρολογικών ελλειμμάτων (loss rate methods)
- υπομοντέλο εκτίμησης άμεσης απορροής (transform methods)
- υπομοντέλο εκτίμησης βασικής απορροής (baseflow methods)
- υπομοντέλο διόδευσης πλημμυρών (routing methods),

μέσω των οποίων γίνεται και μια φυσική περιγραφή της λεκάνης απορροής.

3.3.1.1 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Το υπομοντέλο εκτίμησης των υδρολογικών ελλειμμάτων αποσκοπεί στην κατασκευή του καθαρού υετογραφήματος, που συνεισφέρει στην παραγωγή άμεσης απορροής. Ως υδρολογικά ελλείμματα νοούνται οι ποσότητες νερού που κατακρατούνται επιφανειακά (παρεμποδίζονται από τη χλωρίδα ή παγιδεύονται στις μικροκοιλότητες του εδάφους) και διηθούνται (δηλαδή εισχωρούν στο έδαφος) κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου βροχής. Η αναλυτική περιγραφή των εν λόγω διεργασιών ξεφεύγει από τους πρακτικούς σκοπούς μιας υδρολογικής μελέτης. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα συνολικής εκτίμησης των ελλειμμάτων, τα οποία για δεδομένο ύψος βροχής, υπολογίζουν την ενεργό βροχή ή πλεόνασμα βροχής. Το HEC - HMS ενσωματώνει διάφορα τέτοια μοντέλα, όπως:

- το μοντέλο αρχικών και σταθερού ρυθμού απωλειών (μέθοδος δείκτη ϕ – initial constant)
- το μοντέλο απωλειών της Soil Conservation Service (μέθοδος SCS curve number)
- το μοντέλο φυσικής βάσης Green - Ampt
- το εννοιολογικό μοντέλο εδαφικής υγρασίας SMA (Soil Moisture Accounting), σε συγκεντρωτική και κατανεμημένη μορφή.

3.3.1.2 ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ

Για την εκτίμηση της άμεσης απορροής, το HEC - HMS υλοποιεί τον μετασχηματισμό του καθαρού υετογραφήματος σε πλημμυρογράφημα (δηλαδή το τμήμα του υδρογραφήματος που οφείλεται αποκλειστικά στην ταχεία απόκριση της λεκάνης με τη μορφή επιφανειακής και ενδιάμεσης απορροής), εφαρμόζοντας είτε την εμπειρική μέθοδο του μοναδιαίου υδρογραφήματος (σε διάφορες εκδοχές της) είτε ένα φυσικής βάσης μοντέλο κινηματικού κύματος (kinematic wave). Ειδικότερα, η προσέγγιση του μοναδιαίου υδρογραφήματος, εστιάζει αποκλειστικά στον μετασχηματισμό της ενεργού βροχής σε απορροή, μη λαμβάνοντας υπόψη τις υπόλοιπες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου. Το μοναδιαίο υδρογράφημα είτε εισάγεται από τον χρήστη είτε κατασκευάζεται συνθετικά. Στην τελευταία περίπτωση, τα χαρακτηριστικά μεγέθη του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΣΜΥ), δηλαδή ο χρόνος ανόδου και η παροχή αιχμής, εκτιμώνται συναρτήσει των

χαρακτηριστικών της λεκάνης. Το πρόγραμμα υποστηρίζει διάφορους τύπους ΣΜΥ, όπως του Snyder, του Clark (στην αρχική και τροποποιημένη εκδοχή του) και του SCS.

3.3.1.3 ΒΑΣΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ

Η βασική απορροή είναι η συνιστώσα του υδρογραφήματος που οφείλεται στη βραδεία απόκριση της λεκάνης, με τη μορφή επιφανειακής εκφόρτισης του υποκείμενου υδροφορέα. Από τη σύνθεση της βασικής και άμεσης απορροής, προκύπτει η συνολική απορροή (ολικό υδρογράφημα), που ενδιαφέρει στα πλαίσια μιας μελέτης πλημμυρών. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια των πλημμυρικών επεισοδίων, η βασική απορροή αποτελεί μικρό μόνο ποσοστό της συνολικής παροχής, που γίνεται πιο αμελητέο όσο αυξάνει η περίοδος επαναφοράς. Το πρόγραμμα υποστηρίζει τα ακόλουθα μοντέλα εκτίμησης της βασικής απορροής:

- μοντέλο σταθερής τιμής, μεταβαλλόμενης ανά μήνα (constant monthly baseflow)
- μοντέλο εκθετικής μείωσης (Recession method)
- μοντέλο γραμμικού ταμιευτήρα.

3.3.1.4 ΔΙΟΔΕΥΣΗ

Τέλος, το πρόγραμμα ενσωματώνει διάφορα σχήματα διόδευσης :

- Lag method (μέθοδος καθυστέρησης – όχι εξασθένιση πλημμυρικού κύματος)
- Muskingum
- κινηματικού κύματος (kinematic wave)
- Modified Puls
- Muskingum – Cunge

ενώ παρέχει και τη δυνατότητα διόδευσης του υδρογραφήματος μέσω του υπερχειλιστή ταμιευτήρα.

3.3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ (METEOROLOGY DESCRIPTION)

Στο κομμάτι αυτό του προγράμματος γίνεται η χωροχρονική κατανομή των παρατηρημένων βροχοπτώσεων στην λεκάνη, της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και των χιονοπτώσεων.

3.3.2.1 ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ

Για την κατανομή των παρατηρημένων και καταγεγραμμένων επεισοδίων βροχής στην λεκάνη παρέχονται τέσσερις εναλλακτικές οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με το σκοπό της εργασίας και τον τύπο των δεδομένων που έχουμε στη διάθεσή μας :

- Παρατηρημένα Υετογράμματα σταθμών για κάθε υπολεκάνη (specified hyetographs)
- Απόδοση βαρών στους σταθμούς (πολύγωνα Thiessen) για κάθε λεκάνη
- Απόδοση τιμής σε κάθε στοιχείο του καννάβου (gridded method). Απαιτούνται βροχομετρικά δεδομένα από radar
- Συνθετικά Υετογράμματα με βάση στατιστικές μεθοδολογίες.

3.3.2.2 ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ - ΧΙΟΝΟΠΤΩΣΗ

Ομοίως, για την δυνητική εξατμισοδιαπνοή χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος Priestley – Taylor με ενσωμάτωση φυτικού συντελεστή. Όσον αφορά στη χιονόπτωση και στη μεταβολή του χιονιού σε απορροή, στο πρόγραμμα υπάρχει μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί ατμοσφαιρικά καθώς και θερμοκρασιακά δεδομένα.

3.3.3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για να λάβει χώρα η προσομοίωση μέσω του προγράμματος, πρέπει να συντεθούν όλα τα παραπάνω στοιχεία - δεδομένα τα οποία αναφέρθηκαν. Θα πρέπει δηλαδή να εισαχθούν κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης από το πρόγραμμα, το συγκεκριμένο μετεωρολογικό μοντέλο που δημιουργήσαμε και η λεκάνη απορροής

με όλα της τα χαρακτηριστικά. Απαραίτητος βέβαια είναι και ο καθορισμός της έναρξης και λήξης του επεισοδίου καθώς και του χρονικού βήματος των υπολογισμών. Εφόσον λοιπόν συνθέσουμε επιτυχώς όλα τα παραπάνω – αν υπάρξει κάποια παράλειψη ή λάθος το πρόγραμμα θα εμφανίσει ένα μήνυμα λάθους κ δεν θα συνεχίσει την προσομοίωση – θα ολοκληρωθεί και η διαδικασία της προσομοίωσης και θα είμαστε σε θέση να αποκτήσουμε όλα τα αποτελέσματα τα οποία παράγονται από το πρόγραμμα. Πιο αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας και των μαθηματικών μοντέλων που επιλέξαμε γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.3.4 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Για να είναι επιτυχής η εν λόγω προσομοίωση γίνονται διάφορες δοκιμές βελτιστοποίησης παραμέτρων (βαθμονόμηση). Ο όρος βαθμονόμηση (calibration) προέρχεται από τις στατιστικές επιστήμες και υποδηλώνει μια συστηματική διαδικασία προσαρμογής των τιμών των παραμέτρων ενός υδρολογικού μοντέλου, έτσι ώστε οι προσομοιωμένες αποκρίσεις του να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις αντίστοιχες παρατηρημένες τιμές. Για κάθε υπομοντέλο υπάρχουν και διαφορετικές παράμετροι ενώ οι τιμές τους διαφοροποιούνται ανά υπολεκάνη.

Το πρόγραμμα ενσωματώνει διάφορα εργαλεία βελτιστοποίησης, που μας διευκολύνουν στη βαθμονόμηση. Επειδή, ωστόσο, πρόκειται για αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης, η χρήση των εν λόγω αλγορίθμων δεν εγγυάται τον εντοπισμό της ολικά βέλτιστης λύσης, εξαιτίας του προβλήματος των τοπικών ακρότατων. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης εντοπίζεται ένας συγκεκριμένος συνδυασμός παραμέτρων ο οποίος όμως δεν είναι μοναδικός. Υπάρχουν χιλιάδες διαφορετικοί συνδυασμοί που προσομοιώνουν σε ικανοποιητικό βαθμό την λεκάνη και την απορροή αυτής. Η επιλογή του τελικού συνδυασμού, εφόσον όλα τα κριτήρια ικανοποιούνται (οι τιμές εντός ορίων και ερμηνεύσιμες από φυσικής πλευράς) θα προέρχεται από ένα κράμα εμπειρίας και κρίσης του μελετητή. Στοιχεία, με πρωτεύοντα ρόλο, όταν τα εργαλεία του προγράμματος ‘δυσκολεύονται’ να προσαρμόσουν, στον υψηλότερο βαθμό, τις προσομοιωμένες στις παρατηρημένες αποκρίσεις. Το πρόγραμμα παρόλα αυτά μας παρέχει αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επιτυχίας της προσαρμογής αυτής.

3.3.5 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ

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

Το πρόγραμμα λοιπόν μας δίνει τη δυνατότητα να ‘τρέξουμε’ ένα νέο επεισόδιο, μεταγενέστερο από αυτά τα οποία χρησιμοποιήσαμε στο καλιμπράρισμα, και τοποθετώντας τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων που υπολογίσαμε, να ελέγξουμε κατά πόσο μπορούμε να πλησιάσουμε τα παρατηρημένα δεδομένα. Άρα και κατά πόσο το όλο μας εγχείρημα έχει στεφθεί με επιτυχία.

3.3.6 ΣΤΑΔΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

Συγκεντρωτικά λοιπόν, τα κύρια βήματα της μοντελοποίησης μέσω του προγράμματος HEC - HMS είναι επτά. Επιγραμματικά έχουν ως εξής:

1. Επεξεργασία δεδομένων εισόδου (χαρτών, κλιματικών χρονοσειρών κ.λ.π.)
2. Σχηματοποίηση λεκάνης απορροής (watershed delineation) στο HEC - GeoHMS
3. Συμπλήρωση παραμέτρων αρχείων προγράμματος HEC-HMS (parameterization)
4. Εκτέλεση (run)
5. Ρύθμιση (calibration). Μεταβολή παραμέτρων του μοντέλου με σκοπό τη σύγκλιση προσομοιωμένων και παρατηρημένων πλημμυρογραφημάτων.
6. Επαλήθευση (validation). Σύγκριση ενός ανεξάρτητου set πλημμυρογραφημάτων με τα αντίστοιχα του μοντέλου χωρίς περαιτέρω μεταβολή των παραμέτρων.
7. Αξιολόγηση (verification). Διερεύνηση της τεχνικής που ακολουθείται από τον κώδικα του προγράμματος για τις μεταβολές αυτές ώστε να επιβεβαιωθεί ότι προκύπτουν με αξιοπιστία - Αποφυγή ‘λανθασμένης’ προσαρμογής του μοντέλου στην πραγματικότητα

3.3.7 ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΑ HEC – HMS - ΠΗΓΕΣ

Το Ινστιτούτο Υδατικών Πόρων των ΗΠΑ και πιο συγκεκριμένα ο Οργανισμός του Ειδικού Σώματος Μηχανικών του Στρατού (Hydrologic Engineering Center – US Army Corps of Engineers) έχει δημιουργήσει ένα δικτυακό τόπο, www.hec.usace.army.mil, από τον οποίο μπορεί ο καθένας να προμηθευτεί το πρόγραμμα HEC – HMS καθώς επίσης και τα εγχειρίδια που το συνοδεύουν. Τα εγχειρίδια αυτά είναι τα εξής:

- User’s Manual (εγχειρίδιο χρήστη)
- Technical Reference Manual (τεχνικό εγχειρίδιο)
- Application Guide (εφαρμογές)

Το User’s Manual παρέχει όλες τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για να είμαστε σε θέση να τρέξουμε το πρόγραμμα. Αναλυτικό και με περιγραφή βήμα βήμα όλων των ενεργειών που απαιτούνται, από την εγκατάσταση του προγράμματος έως και την παραγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.

Το Technical Reference Manual είναι το τεχνικό εγχειρίδιο. Περιέχει δηλαδή το μαθηματικό κομμάτι και την ανάλυση όλων των μοντέλων που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα.

Τέλος, το Application Guide είναι ένα εγχειρίδιο στο οποίο περιέχονται οι διαφορετικές καταστάσεις – περιπτώσεις που το πρόγραμμα βρίσκει εφαρμογή και παράγει αποτελέσματα. Για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις δίνονται συνοπτικές οδηγίες για τα βήματα που πρέπει να ακολουθήσουμε.

Για να είναι σε θέση λοιπόν κάποιος να χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα με ευχέρεια, είναι απαραίτητη η μελέτη των τριών αυτών εγχειριδίων, η πλήρης κατανόηση των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη προσομοίωσης και βέβαια η συνεχής τριβή και η πρακτική εξάσκηση.

Η συγγραφή του συγκεκριμένου κεφαλαίου έχει προκύψει από την μελέτη των εγχειριδίων αυτών και την πρακτική εξάσκηση πάνω στο πρόγραμμα.

(Πηγή: www.hec.usace.army.mil , User’s Manual, Technical Reference Manual, Application Guide)

4 : ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τους τρόπους συλλογής των πρωτογενών δεδομένων, την επεξεργασία τους ώστε να μπορούμε να τα εισάγουμε στο μοντέλο HEC – HMS καθώς επίσης και μια λεπτομερή ανάλυση των μαθηματικών προτύπων που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε κατά την προσομοίωση. Ουσιαστικά δηλαδή, παρουσιάζουμε την όλη διαδικασία της προσομοίωσης. Ως πρωτογενή δεδομένα εννοούμε τα παρατηρημένα ύψη βροχής για κάθε σταθμό και τις καταγεγραμμένες τιμές στάθμης στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’.

4.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΥΨΟΥΣ ΒΡΟΧΗΣ

Για την συλλογή δεδομένων βροχόπτωσης υπάρχουν τρεις δυνατότητες, τα βροχόμετρα, οι βροχογράφοι και τα ραντάρ. Παραθέτουμε λοιπόν μια αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά των οργάνων αυτών.

4.1.1 ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΑ

Τα βροχόμετρα είναι όργανα σημειακής μέτρησης της βροχής εγκατεστημένα σε κατάλληλες θέσεις που συλλέγουν κυρίως τη βροχόπτωση, και βοηθητικά τη χιονόπτωση, δίνοντας την αντίστοιχη σημειακή μέτρηση. Δίνουν την ολική σημειακή βροχόπτωση και το ισοδύναμο ύψος νερού μιας χιονόπτωσης ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα (συνήθως 8ωρο, 12ωρο ή 24ωρο), με την ανάγνωση της ένδειξης από έναν παρατηρητή.

Ο κλασικός τύπος βροχόμετρου είναι κυλινδρικός σε σχήμα και αποτελείται από το συλλέκτη, το χωνί και τον αποδέκτη. Ο συλλέκτης είναι ένας κύλινδρος, αρκετά ψηλός, με κατακόρυφα τα εσωτερικά τοιχώματα, που καταλήγει στο χωνί, του οποίου το άνοιγμα έχει την ίδια διάμετρο με αυτήν του συλλέκτη. Η κλίση των

τοιχωμάτων είναι τουλάχιστον 45° για να προλαβαίνει τις απώλειες νερού που μπορεί να προκληθούν κατά την πρόσκρουση των σταγόνων της βροχής. Το χωνί καταλήγει στον αποδέκτη που έχει στενή είσοδο και προστατεύεται από την ηλιακή ακτινοβολία για να ελαχιστοποιείται η απώλεια νερού από εξάτμιση.

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι βροχόμετρων είναι το ογκομετρικό και το δεκαπλασιαστικό. Τα ογκομετρικά βροχόμετρα γνωστής διατομής του συλλέκτη συνοδεύονται από ειδικούς ογκομετρικούς σωλήνες. Στα δεκαπλασιαστικά βροχόμετρα η επιφάνεια του συλλέκτη είναι δεκαπλάσια από την επιφάνεια της διατομής του αποδέκτη, έτσι που το ύψος της βροχής που φτάνει στο συλλέκτη γίνεται δέκα φορές μεγαλύτερο στον αποδέκτη, με αποτέλεσμα την αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τον υδρολόγο ενδιαφέρει μόνο η εποχιακή βροχόπτωση ή η μέτρηση της βροχής σε περιοχές που δεν είναι εύκολο να προσπελαθούν, κυρίως κατά την περίοδο του χειμώνα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο αποδέκτης διαμορφώνεται έτσι που να χωράει όλο το πιθανό ύψος βροχής που αναμένεται να πέσει κατά μια σχετικά μακρά χρονική περίοδο. Επειδή υπάρχει πιθανότητα το νερό στον αποδέκτη να παγώσει. Όταν το όργανο είναι εγκατεστημένο σε ορεινές κυρίως τοποθεσίες κι ακόμη για να λιώσει το χιόνι που πέφτει, το βροχόμετρο εφοδιάζεται με αντιπηκτικό, με προτίμηση στην αιθυλική αλκοόλη. Ακόμη προστίθεται μια μικρή ποσότητα λεπτόρρευστου λαδιού για τον περιορισμό των απωλειών από την εξάτμιση.

4.1.2 ΒΡΟΧΟΓΡΑΦΟΙ

Οι βροχογράφοι είναι όργανα σημειακής μέτρησης της βροχής, εγκατεστημένα σε κατάλληλες θέσεις, που συλλέγουν κυρίως τη βροχόπτωση, και βοηθητικά τη χιονόπτωση, καταγράφοντας με απλό ωρολογιακό μηχανισμό τη μεταβολή του ύψους βροχής στο χρόνο, περιγράφοντας έτσι τη χρονική κατανομή της σημειακής βροχόπτωσης.

Τρεις κυρίως τύποι βροχογράφων είναι σήμερα σε χρήση, ο βροχογράφος με ανατρεπόμενους κάδους, ο σταθμιστικός βροχογράφος και ο βροχογράφος με πλωτήρα. Οι βροχογράφοι δίνουν παρατηρήσεις για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλοι για τη μελέτη της διακύμανσης της έντασης

μιας βροχής. Αν ο αυτογραφικός μηχανισμός τους ρυθμιστεί έτσι ώστε το τύμπανο που φέρει το χαρτί καταγραφής να κάνει μια πλήρη περιστροφή την ημέρα (να χρειάζεται δηλαδή αλλαγή χαρτιού κάθε μέρα), το ύψος της βροχής μπορεί να μετράται κατά 5λεπτα διαστήματα. Αν ο μηχανισμός ρυθμιστεί για αλλαγή χαρτιού μια φορά την εβδομάδα, το ύψος της βροχής μπορεί να μετρηθεί ανά 30λεπτα διαστήματα.

Ο βροχογράφος με ανατρεπόμενους κάδους αποτελείται από δύο μικρούς κάδους που είναι τοποθετημένοι σε κοινό άξονα κ μετακινούνται πάνω κάτω, καθώς γεμίζουν με το νερό της βροχής που κατευθύνεται προς αυτούς από το χωνί του οργάνου. Για την ανατροπή ενός κάδου χρειάζεται βροχή ίση με το $\frac{1}{4}$ του χιλιοστού κι ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για μια ανατροπή είναι $\frac{2}{10}$ του δευτερολέπτου. Οι ιδιότητες αυτές του οργάνου έχουν σαν συνέπεια την εμφάνιση σφαλμάτων όταν η βροχή είναι πολύ ελαφρά και χρειάζεται χρόνος για να γεμίσει ο κάδος, οπότε το νερό που συγκεντρώνεται σε αυτόν υπόκειται σε εξάτμιση, κι όταν η βροχή είναι πολύ ραγδαία κι ο κάδος γεμίζει σε χρόνο μικρότερο από $\frac{2}{10}$ του δευτερολέπτου. Οι ανατρεπόμενοι κάδοι συνδέονται με μηχανισμό καταγραφής που μεταφέρει τις παρατηρήσεις στο χαρτί καταγραφής.

Ο σταθμιστικός βροχογράφος αποτελείται από ένα δοχείο που είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα ελατήριο. Καθώς το νερό της βροχής συγκεντρώνεται στο δοχείο, το ελατήριο συμπιέζεται προς τα κάτω και η συμπίεση αυτή μεταφέρεται από ένα μηχανισμό στο χαρτί καταγραφής. Η δυναμικότητα του οργάνου φτάνει να συγκεντρώσει μέχρι και 1000mm βροχής. Μια παραλλαγή του οργάνου, αντί για χαρτί καταγραφής, χρησιμοποιεί διατρητική ταινία που μπορεί να εισαχθεί σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται κάποια πηγή ενέργειας για τη λειτουργία του διατρητικού μηχανισμού.

Ο βροχογράφος με πλωτήρα αποτελείται από ένα δοχείο που συγκεντρώνει το νερό της βροχής και στο οποίο υπάρχει ένας πλωτήρας που μεταφέρει τις μεταβολές της στάθμης του νερού στο χαρτί καταγραφής με κατάλληλο μηχανισμό.

Για να αποφεύγονται χονδροειδή σφάλματα, πρέπει σε κάθε αλλαγή ταινίας να μετριέται το συνολικό ύψος βροχής στον τελικό κύλινδρο συλλογής της βροχής και να συγκρίνεται με το αντίστοιχο συνολικό ύψος που καταγράφηκε στην ταινία.

Αντί του παραπάνω συμβατικού μηχανισμού καταγραφής, η τεχνολογία μετρήσεων δίνει τη δυνατότητα μετατροπής της κίνησης του μηχανισμού αυτοματισμού της

μέτρησης σε ψηφιακό σήμα. Το σήμα αυτό, αντί να καταγράφεται σε χαρτί, μπορεί να αποθηκεύεται σε ηλεκτρονικό καταχωρητή δεδομένων (data logger). Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα της τηλεμετρίας, δηλαδή της μετάδοσης του σήματος αυτού (μετά από κατάλληλη διαμόρφωση) είτε ασύρματα (μέσω ραδιοπομπού ή και δορυφόρου), είτε ενσύρματα (μέσω τηλεφωνικής γραμμής) και της λήψης του την ίδια στιγμή σε άλλη απομακρυσμένη θέση.

4.1.3 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟ ΡΑΝΤΑΡ

Τα συμβατικά βροχομετρικά στοιχεία κρίνονται γενικά ανεπαρκή να περιγράψουν τη χωρική και χρονική κατανομή της βροχής. Μια μέθοδος στην οποία έχει αποδοθεί μεγάλη σημασία τα τελευταία χρόνια, είναι η μέτρηση της βροχής με στοιχεία από ραντάρ καιρού. Αυτό, γιατί το ραντάρ υπερτερεί έναντι του δικτύου βροχογράφων στα εξής σημεία:

- Η συνολική πληροφορία της κατανομής της βροχής στο χρόνο και στο χώρο συγκεντρώνεται και επεξεργάζεται για κάθε στοιχείο ξεχωριστά, δηλαδή τα προβλήματα εξαιτίας της διαφοροποίησης μιας περιοχής ξεπερνιούνται με τη χρήση ραντάρ
- Η χρήση ενός μετεωρολογικού ραντάρ είναι πολύ πιο εύκολη από τη χρήση ενός δικτύου βροχογράφων.

Οι βροχογράφοι και το μετεωρολογικό ραντάρ είναι δύο διαφορετικά συστήματα μέτρησης βροχής. Η περιοχή μέτρησης από ένα βροχογράφο είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με αυτή του ραντάρ. Μια άλλη αιτία που διαφοροποιεί το ποσό της βροχής που μετράται από τα δύο όργανα είναι ότι το ραντάρ σαρώνει σε μια απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ ο βροχογράφος μετράει τη βροχή στην επιφάνεια του εδάφους. Οι βροχογράφοι έχουν ανάλυση πάνω από 5 λεπτά (οι πιο σύγχρονοι 1 λεπτό), ενώ οι μετρήσεις του ραντάρ είναι σχεδόν στιγμιαίες (20 sec/στροφή) οπότε για τη σύγκριση των μετρημένων ποσοτήτων βροχής τα στοιχεία του ραντάρ θα πρέπει να ολοκληρώνονται ως προς το χρόνο.

4.1.4 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΓΡΑΦΩΝ

Οι βασικοί κανόνες για την εγκατάσταση των βροχόμετρων – βροχογράφων μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Τοποθέτηση βροχόμετρου ή βροχογράφου σε περιοχές που προφυλάσσονται από ανέμους από όλες τις διευθύνσεις, δηλαδή απαλλαγμένες από έντονους στροβιλισμούς ή άλλες διαταραχές.
- Τοποθέτηση του συλλέκτη σε ύψος 1 - 1,5μ από την επιφάνεια του εδάφους.
- Περιβολή από δέντρα ή θάμνους αλλά η απόσταση αυτών των εμποδίων από το όργανο μέτρησης να είναι τουλάχιστον διπλάσια από το ύψος τους.

4.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ

Τα πλέον γνωστά όργανα μέτρησης της στάθμης είναι το σταθμήμετρο και ο σταθμηγράφος. Το σταθμήμετρο είναι μια απλή σταδία, όπου είναι αποτυπωμένη εκατοστομετρική κλίμακα, της οποίας το μηδέν έχει εξαρτηθεί υψομετρικά από ένα σταθερό υψόμετρο αναφοράς. Στην περίπτωση που η συνολικά παροχή του ποταμού δεν μπορεί να περιγραφεί από ένα μόνο σταθμήμετρο, τότε εγκαθίστανται περισσότερα στην ίδια διατομή (δεξιά, αριστερά, μέσον) ή ακόμα ανάντη και κατάντη.

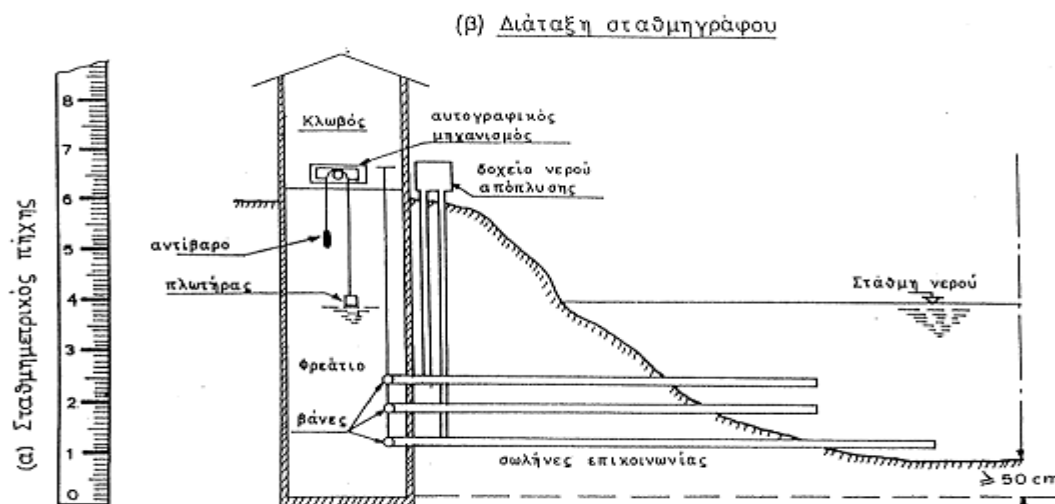
Η μέτρηση της στάθμης γίνεται από παρατηρητή κάθε μέρα στις 08:00 το πρωί, ενώ σε περιπτώσεις πλημμυρών συνήθως γίνεται συχνότερα και κατά τη διάρκεια του πλημμυρικού επεισοδίου. Πολλές φορές η χρήση του σταθμημέτρου συνεπάγεται τον κίνδυνο να παραληφθούν σημαντικές μεταβολές της στάθμης που μπορεί να συμβούν στο χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δυο διαδοχικές παρατηρήσεις. Ακόμη, ορισμένες φορές είναι επιβεβλημένο να γίνουν παρατηρήσεις σε θέσεις της κοίτης που δεν είναι εύκολα προσπελάσιμες από τον παρατηρητή. Για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες αυτές, χρησιμοποιούνται αυτογραφικά όργανα που λέγονται σταθμηγράφοι. Μια τυπική διάταξη σταθμηγράφου (εικόνα 4.1) αποτελείται:

- Από ένα κατακόρυφο φρεάτιο κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, μεταλλικό ή από οπλισμένο σκυρόδεμα, που ο πυθμένας του κατασκευάζεται τουλάχιστον 50εκ. κάτω από τον πυθμένα της κοίτης και βρίσκεται κοντά στην όχθη του ρεύματος.

Από δύο ή τρεις σωλήνες μικρής διαμέτρου, οριζόντια τοποθετημένους, που ενώνουν το μέσο περίπου του ρεύματος με το φρεάτιο. Οι σωλήνες αυτοί κατασκευάζονται με μικρή διάμετρο για να μη μεταφέρουν στο φρεάτιο τις μικρές μεταβολές της στάθμης του νερού του ρεύματος που οφείλονται σε κυματισμό. Αν το απαιτούμενο μήκος των σωλήνων είναι ίσο ή μικρότερο από 5 μέτρα, η σχέση ανάμεσα στις διαμέτρους των σωλήνων και του φρεατίου πρέπει να είναι 1:50, ενώ αν το μήκος είναι μεγαλύτερο από 5 μέτρα η σχέση αυτή πρέπει να είναι 1:25.

- Επειδή οι σωλήνες μπορεί να αποφραχθούν από τα αιωρούμενα στο νερό του ρεύματος λεπτόκοκκα υλικά, κατασκευάζεται συνήθως ένα σύστημα καθαρισμού που αποτελείται από μια μικρή δεξαμενή νερού τοποθετημένη πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, η οποία συνδέεται με σωληνώσεις με τους οριζόντιους σωλήνες. Η δεξαμενή, κατά διαστήματα, γεμίζεται με νερό με τη βοήθεια χειροκίνητης αντλίας και αφήνεται μετά να αδειάσει απότομη διαδικασία αυτή είναι συνήθως αρκετή για τον καθαρισμό.

- Πάνω ακριβώς από το φρεάτιο κατασκευάζεται ο σταθμηγραφικός μηχανισμός. Ο σταθμηγραφικός μηχανισμός αποτελείται από έναν πλωτήρα που επιπλέει στην επιφάνεια του νερού μέσα στο φρεάτιο και είναι συνδεδεμένος με καλώδιο που στο άλλο άκρο του φέρει αντίβαρο και με κατάλληλη διάταξη μεταφέρει τις μεταβολές της στάθμης στο σύστημα καταγραφής. Το σύστημα αυτό αποτελείται συνήθως από ένα περιστρεφόμενο, με ελατήριο ή συσσωρευτή, τύμπανο, στο οποίο προσαρμόζεται το καταγραφικό χαρτί και μια ακίδα που η θέση της στο χαρτί καθορίζεται από τη στάθμη του νερού στο φρεάτιο. Αργότερα, χρησιμοποιήθηκε και ένας άλλος τύπος σταθμηγράφου, που αντί για περιστρεφόμενο τύμπανο έχει ένα διατηρητικό μηχανισμό που μεταφέρει τις μεταβολές της στάθμης σε ειδική χαρτοταινία, για απευθείας τροφοδότηση σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Εικόνα 4.1: Τυπική διάταξη σταθμηγράφου

4.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΑΘΜΩΝ – ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΕΠΕΙΣΟΔΙΩΝ

Η επιλογή των βροχογραφικών σταθμών και συγκεκριμένων επεισοδίων βροχής ήταν μια επίπονη διαδικασία καθώς οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν και έπρεπε να αντιμετωπιστούν ήταν πολλές. Το πρώτο βήμα ήταν ο εντοπισμός ενός καθαρού επεισοδίου βροχής από την παρατήρηση της στάθμης του σταθμηγράφου στη γέφυρα Αλή Εφέντη. Τα δεδομένα στάθμης, τα οποία παραλάβαμε από το ΥΠΕΧΩΔΕ σε ψηφιακή μορφή, είναι ανά μισή ώρα αλλά δυστυχώς αφορούν μόνο την περίοδο έως το 1993. Από το ΥΠΕΧΩΔΕ παραλάβαμε και τα δεδομένα ύψους βροχής (30λεπτα) για τους βροχομετρικούς σταθμούς Μεγάλη Κερασιά και Καρδίτσα οι οποίοι είναι αντιπροσωπευτικοί της πρώτης και της δεύτερης υπολεκάνης αντίστοιχα. Για τον σταθμό της Καρδίτσας δεν βρέθηκαν για όλα τα επεισόδια 30λεπτα δεδομένα και για αυτό χρησιμοποιήθηκε και το συνολικό ύψος βροχής των επεισοδίων. Για την υπό μελέτη λεκάνη, δεδομένα βροχόπτωσης αναλόγου χρονικού βήματος υπάρχουν και για τον σταθμό Δρακότρυπα, ο οποίος είναι αντιπροσωπευτικός της τρίτης υπολεκάνης. Τα δεδομένα αυτά τα προμηθευτήκαμε από την Διεύθυνση Υδροηλεκτρικών Έργων της ΔΕΗ, υπό μορφή ταινιών. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία για τους σταθμούς αυτούς (τύπος σταθμού, περιοχή έδρασης, συντεταγμένες X, Y και υψόμετρο), ενώ

στην εικόνα 4.2 απεικονίζεται η χωροθέτησή τους στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής:

Σταθμός	Τύπος	Περιοχή	X	Y	Υψόμετρο (μέτρα)
Μεγάλη Κερασιά	Βροχογράφος	Υπολεκάνη 1	285469.8	4402923.1	509
Καρδίτσα	Βροχογράφος	Υπολεκάνη 2	321566.5	4359249.1	106.7
Δρακότριπα	Βροχογράφος	Υπολεκάνη 3	292721.5	4363406.5	574.2

Πίνακας 4-1 : Στοιχεία σταθμών περιοχής μελέτης



Εικόνα 4.2 : Διάταξη σταθμών στην υπό μελέτη λεκάνη απορροής

Τα στοιχεία αυτά για τους σταθμούς καθώς επίσης και ένα σύνολο πληροφοριών για την ευρύτερη περιοχή μελέτης, τα συλλέξαμε από την Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας. Η Ε.Τ.Υ.Μ.Π. αποτελεί μια πλατφόρμα η οποία διαμορφώνει σε επίπεδο χώρας την απαραίτητη υποδομή για την εκτίμηση, αξιοποίηση και ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων της χώρας. Είναι ένα έργο του Ε.Μ.Π για λογαριασμό του ΥΠΕΧΩΔΕ, το οποίο πλέον μπορεί να παρέχει ένα πλούτο υδρομετεωρολογικών και υδρογεωλογικών δεδομένων καθώς επίσης και μοντέλα για τη σύνθεση και ανάλυση των δεδομένων αυτών και την παραγωγή δευτερευουσών πληροφοριών.

Όσον αφορά στην επιλογή των επεισοδίων, τα στοιχεία που επιδιώξαμε να συνδυάσουμε ήταν:

- Τα επεισόδια να είναι μεμονωμένα, να μην υπάρχουν δηλαδή έντονες βροχοπτώσεις λίγες μέρες πριν και μετά το επιλεγμένο επεισόδιο
- Να είναι μεγάλης έντασης και ικανοποιητικής διάρκειας έτσι ώστε να δίνουν μια αξιόλογη απορροή
- Να είναι επεισόδια τα οποία είναι χαρακτηριστικά για όλη την περιοχή και αφορούν όλους τους σταθμούς
- Να αφορούν διαφορετικές περιόδους κατά τη διάρκεια του έτους έτσι ώστε να είναι εμφανής τυχόν διαφορές στα αποτελέσματα λόγω των διαφορετικών μετεωρολογικών και περιβαλλοντολογικών συνθηκών
- Τα δεδομένα τους στους επιλεγμένους σταθμούς να είναι υπαρκτά και οι ταινίες των βροχογράφων να είναι ευανάγνωστες έτσι ώστε να επιτυγχάνουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη αξιοπιστία.
- Τα επεισόδια που συνολικά χρειαζόμαστε απαραίτητως είναι 3, τα δύο αφορούν στην βαθμονόμηση και το τρίτο στην επαλήθευση.

Λαμβάνοντας λοιπόν όλα τα παραπάνω υπόψη και προσπαθώντας να καλύψουμε όσο το δυνατόν περισσότερες των απαιτήσεων, καταλήξαμε συνολικά στις παρακάτω επιλογές:

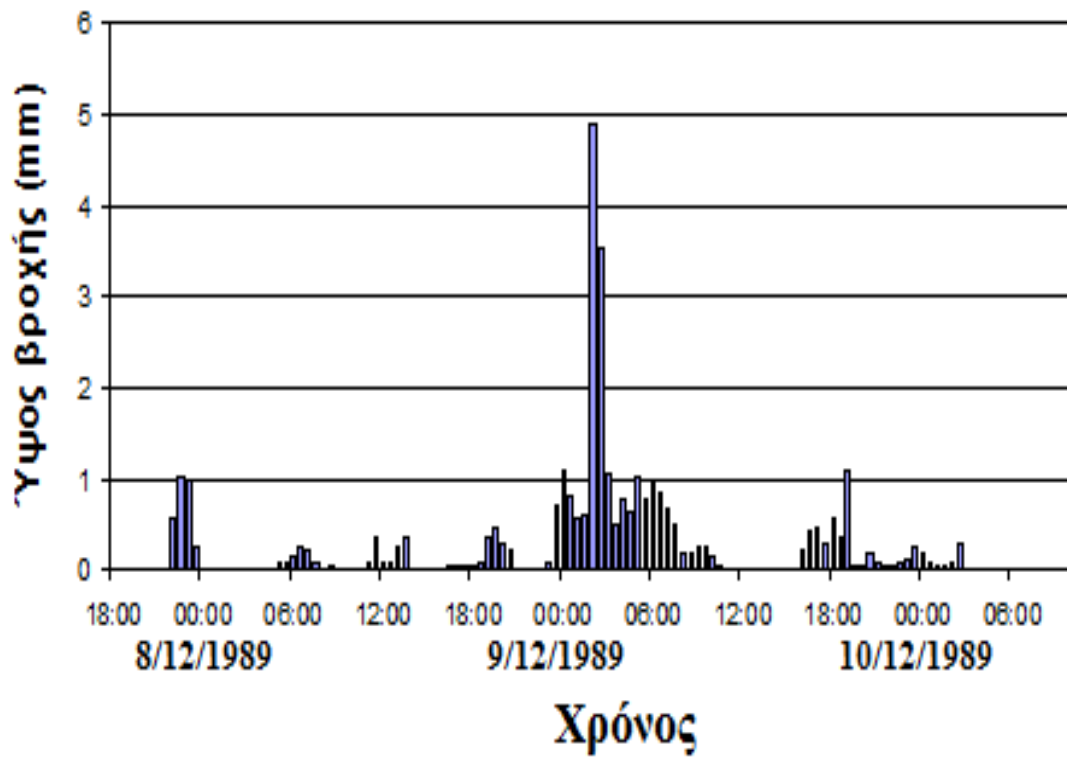
- Επεισόδια βροχόπτωσης:
 - 7-10 Δεκεμβρίου 1989 (βαθμονόμηση)
 - 9-11 Μαΐου 1991 (βαθμονόμηση)
 - 6-7 Απριλίου 1991 (επαλήθευση)

- Δεδομένα ύψους βροχόπτωσης λεκάνης ποταμού Πηνειού:
 - Βροχομετρικός σταθμός Μεγάλης Κερασιάς (υπολεκάνη 1)
 - Βροχομετρικός σταθμός Καρδίτσας (υπολεκάνη 2)
 - Βροχομετρικός σταθμός Δρακότρυπας (υπολεκάνη 3)

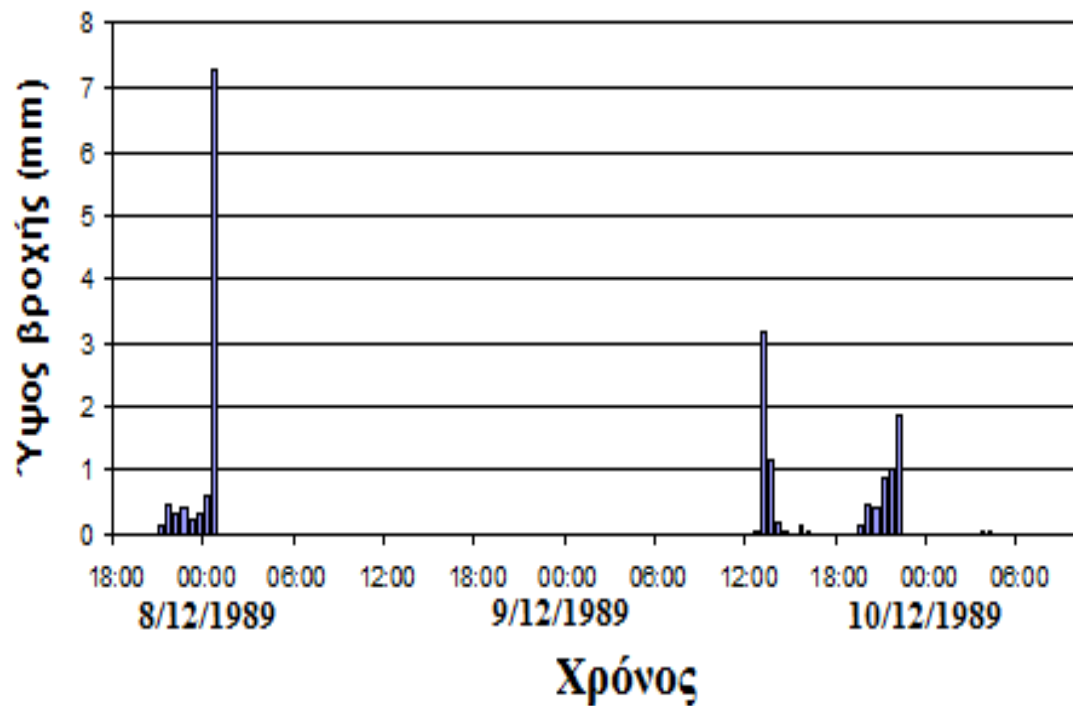
- Δεδομένα στάθμης ποταμού Πηνειού:
 - Σταθμηγράφος Γέφυρας Αλή Εφέντη

4.4 ΒΡΟΧΟΜΕΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

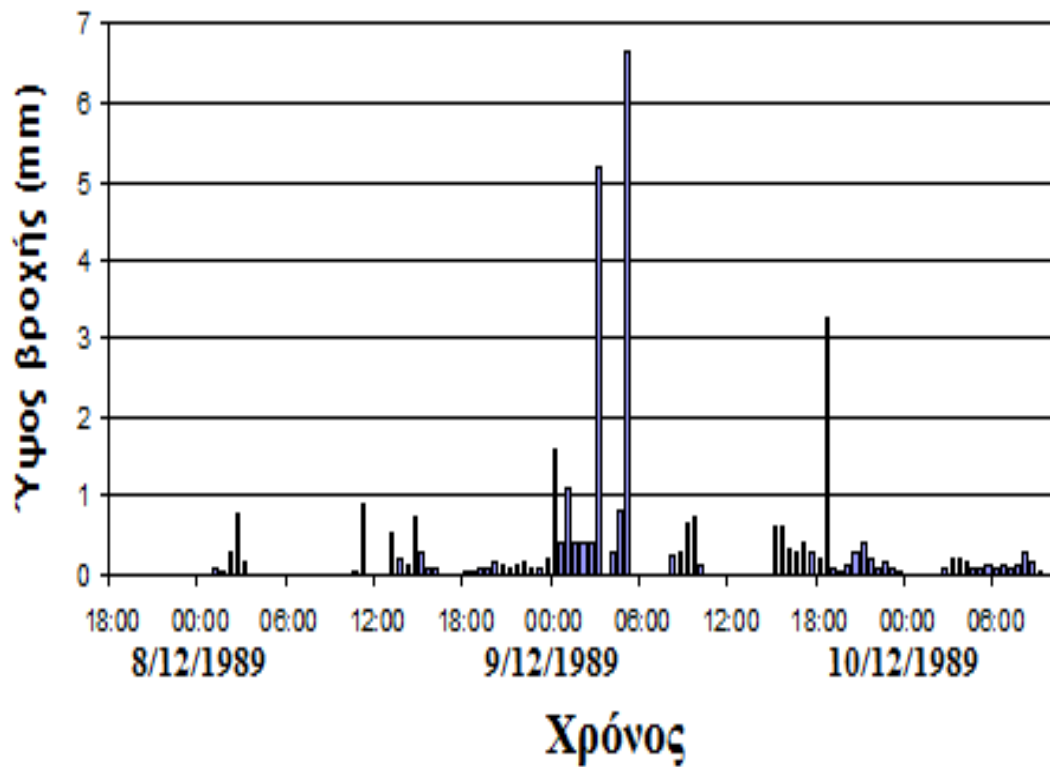
Τα βροχομετρικά δεδομένα, όπως επίσης και τα δεδομένα στάθμης, είναι στοιχεία ιδιαίτερης σημαντικότητας όσον αφορά στην προσομοίωση υδρολογικών διαδικασιών. Αποτελούν πρωτογενή δεδομένα και πάνω σε αυτά στηρίζεται όλη η μεθοδολογία. Είναι λοιπόν αυτονόητο ότι θα πρέπει να καλύπτουν κάποια βασικά κριτήρια αξιοπιστίας. Εδώ εντοπίζεται και το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε. Για ένα μεγάλο αριθμό πλημμυρικών επεισοδίων, τα δεδομένα πάνω στις μετρητικές ταινίες των βροχογράφων ήταν δυσανάγνωστα ενώ για αρκετά μεγάλες περιόδους δεν ήταν καν υπαρκτά λόγω βλάβης των οργάνων. Γίνεται έτσι αντιληπτός ο βαθμός δυσκολίας στο να βρεθούν πλημμυρικά επεισόδια τα δεδομένα των οποίων να είναι διαθέσιμα και ευανάγνωστα για όλους τους σταθμούς. Παρ' όλες τις αντιξοότητες καταλήξαμε στα επεισόδια που αναφέρθηκαν νωρίτερα, τα υετογράμματα των οποίων παρουσιάζονται εδώ για κάθε σταθμό ξεχωριστά. Το χρονικό βήμα είναι 30 λεπτά (αναλυτικά τα δεδομένα των βροχοπτώσεων βρίσκονται στο παράρτημα).



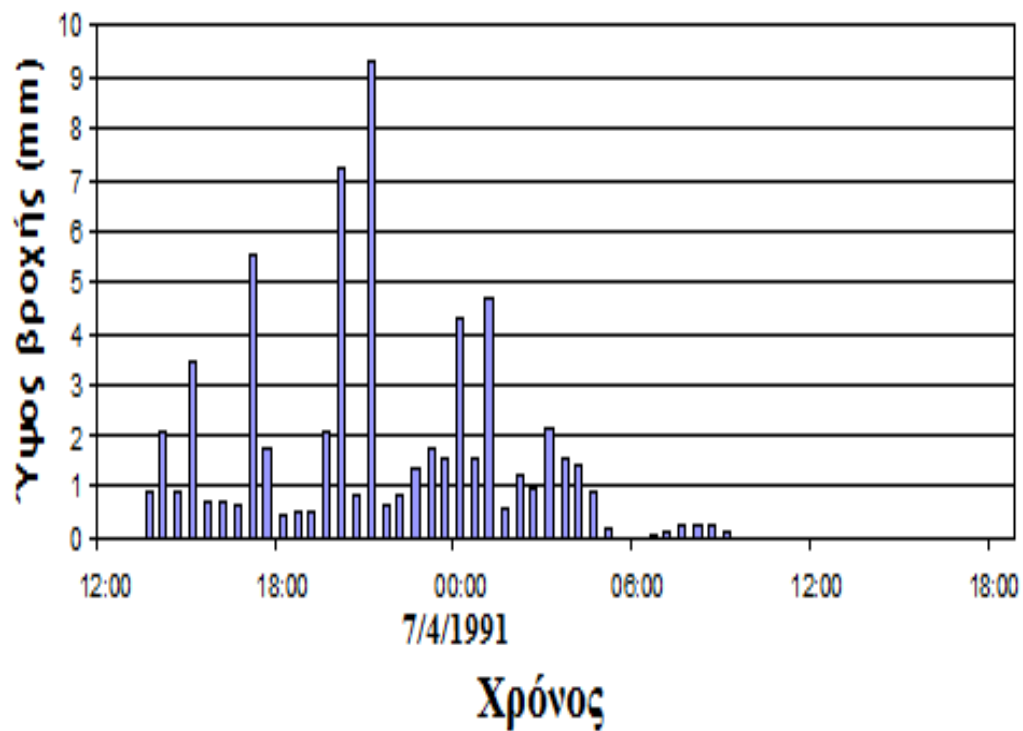
Διάγραμμα 4-1 : Υετόγραμμα σταθμού 'Μεγάλη Κερασιά' για το επιλεγμένο πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.



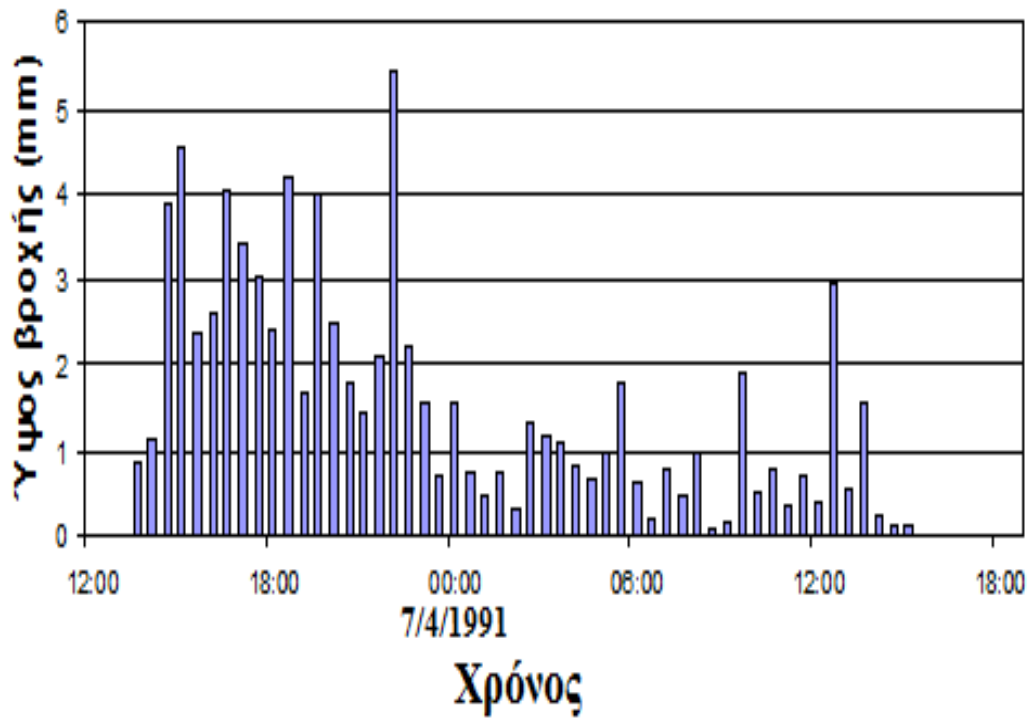
Διάγραμμα 4-2 : Υετόγραμμα σταθμού 'Δρακότρυπα' για το επιλεγμένο πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.



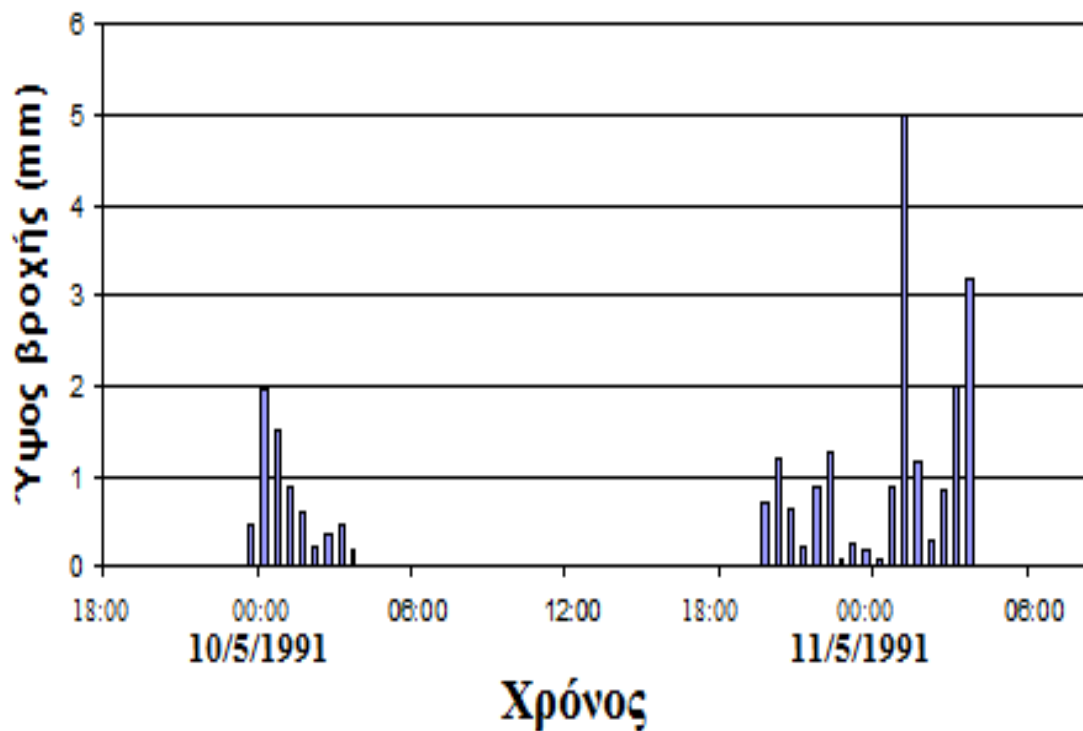
Διάγραμμα 4-3 : Υετόγραμμα σταθμού 'Καρδίτσα' για το επιλεγμένο πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.



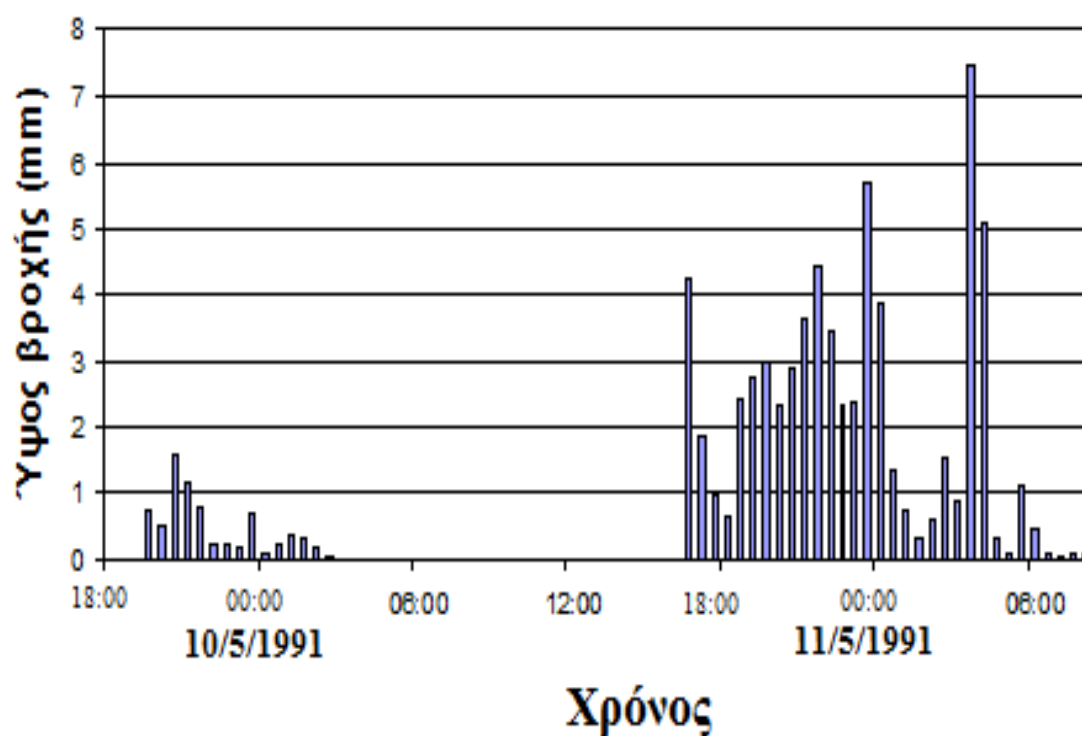
Διάγραμμα 4-4 : Υετόγραμμα σταθμού 'Μεγάλη Κερασιά' για το επιλεγμένο πλημμυρικό επεισόδιο Απριλίου 1991.



Διάγραμμα 4-5 : Υετόγραμμα σταθμού 'Δρακότρυπα' για το επιλεγμένο πλημμυρικό επεισόδιο Απριλίου 1991.



Διάγραμμα 4-6 : Υετόγραμμα σταθμού 'Μεγάλη Κερασιά' για το επιλεγμένο πλημμυρικό επεισόδιο Μαΐου 1991.



Διάγραμμα 4-7 : Υετόγραμμα σταθμού ‘Δρακότρυπα’ για το επιλεγμένο πλημμυρικό επεισόδιο Μαΐου 1991.

4.4.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ

Για την επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών μετρήσεων βροχόπτωσης, τα πολύγωνα Thiessen αποτελούν μια αρκετά αξιόπιστη μέθοδο. Η αρχική ιδέα χρήσης της μεθόδου αυτής γρήγορα απορρίφθηκε λόγω του μικρού αριθμού των διαθέσιμων βροχομετρικών σταθμών και της μη ύπαρξης αναλυτικών δεδομένων σε κάθε έναν από αυτούς για όλα τα επεισόδια. Εξετάζοντας τις εναλλακτικές που παρέχει το μοντέλο αποφασίσαμε να θεωρήσουμε κάθε σταθμό αντιπροσωπευτικό για κάθε υπολεκάνη. Έτσι λοιπόν ο βροχομετρικός σταθμός της Μεγάλης Κερασιάς θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικός για την υπολεκάνη 1, ο σταθμός της Καρδίτσας για την υπολεκάνη 2 και ο σταθμός της Δρακότρυπας για την υπολεκάνη 3.

Για τον σταθμό της Καρδίτσας τα δεδομένα βροχογράφου είναι διαθέσιμα μόνο για το επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989 (αιχμή 10/12/1989). Έχουμε όμως στη διάθεσή μας τα δεδομένα βροχομέτρου για τα άλλα δύο, ημερήσιας βάσης, από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό ύψος βροχής:

Πλημμυρικό επεισόδιο με αιχμή:	Συνολικό ύψος βροχής επεισοδίου (σταθμός Καρδίτσας)
8/4/1991 , 02:30	63.1 mm
11/5/1991 , 23:30	15.4 mm

Πίνακας 4-2 : Συνολικό ύψος βροχής σταθμού Καρδίτσας

Η μόνη διαφορά με το να υπήρχαν τα δεδομένα βροχογράφου είναι ότι ενώ γνωρίζουμε τον συνολικό όγκο των κατακρημνισμάτων, δεν είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την χρονική κατανομή του όγκου αυτού. Για να ξεπεράσουμε τον σκόπελο αυτό θεωρούμε ως αντιπροσωπευτική για την υπολεκάνη 2, την χρονική κατανομή των σταθμών Μεγάλης Κερασιάς και Δρακότρυπας για κάθε επεισόδιο ξεχωριστά, με ποσοστό συμμετοχής 50% έκαστος. Στην απόφαση αυτή, καταλήξαμε παρατηρώντας την θέση των σταθμών στις υπολεκάνες (Εικόνα 4.2 ,σελ 49). Παρατηρούμε λοιπόν, ότι οι σταθμοί ‘Μεγάλη Κερασιά’ και ‘Δρακότρυπα’, εκτός από το γεγονός ότι βρίσκονται σε παραπλήσια υψόμετρα, απέχουν περίπου την ίδια απόσταση από το κέντρο βάρους της υπολεκάνης 2. Για τον λόγο αυτό επιλέχτηκε και η εξ ίσου συμμετοχή (50%) των δύο σταθμών στην χρονική κατανομή της υπολεκάνης.

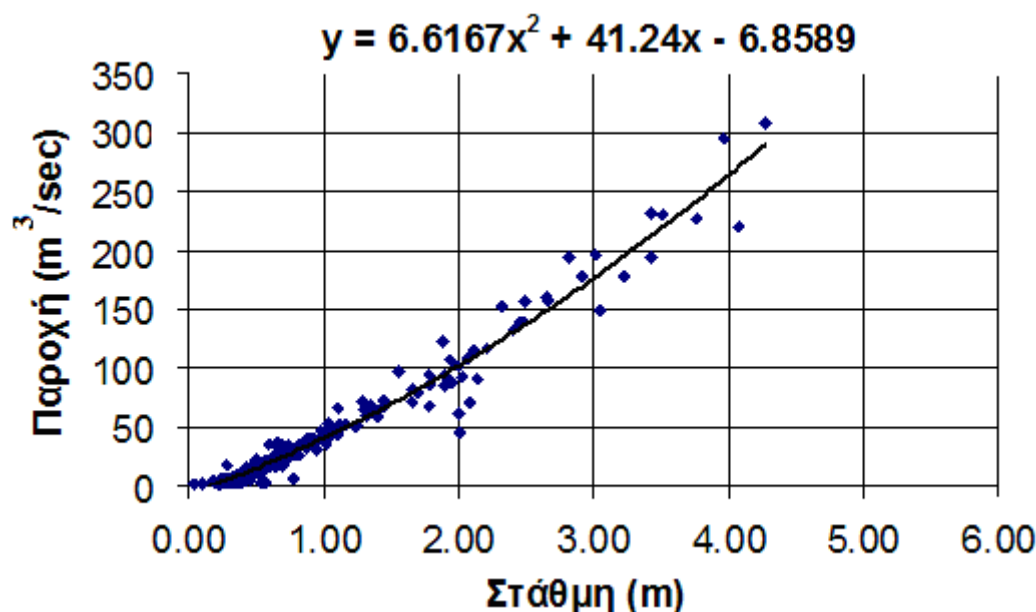
4.5 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΑΡΟΧΗΣ - ΚΑΜΠΥΛΗ ΣΤΑΘΜΗΣ - ΠΑΡΟΧΗΣ

Ο κύριος στόχος της εργασίας αυτής είναι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού μέσω του προγράμματος HEC – HMS. Το τελικό αποτέλεσμα θα ελεγχθεί κατά κάποιο τρόπο στην Γέφυρα του Αλή Εφέντη, η οποία αποτελεί την έξοδο (outlet) της λεκάνης, συγκρίνοντας ουσιαστικά το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα στο σημείο αυτό με το αντίστοιχο προσομοιωμένο μέσω του προγράμματος. Έτσι λοιπόν θα πρέπει να έχουμε τις παρατηρημένες τιμές 30λεπτης παροχής του ποταμού στο σημείο αυτό κατά την διάρκεια και για κάποιες μέρες μετά το τέλος των επεισοδίων βροχόπτωσης. Αντί αυτών, έχουμε τις τιμές 30λεπτης στάθμης του ποταμού. Έχουμε

όμως τη δυνατότητα, με την βοήθεια της εξίσωσης στάθμης – παροχής να μετατρέψουμε τις τιμές στάθμης σε τιμές παροχής και να τις εισάγουμε στο πρόγραμμα.

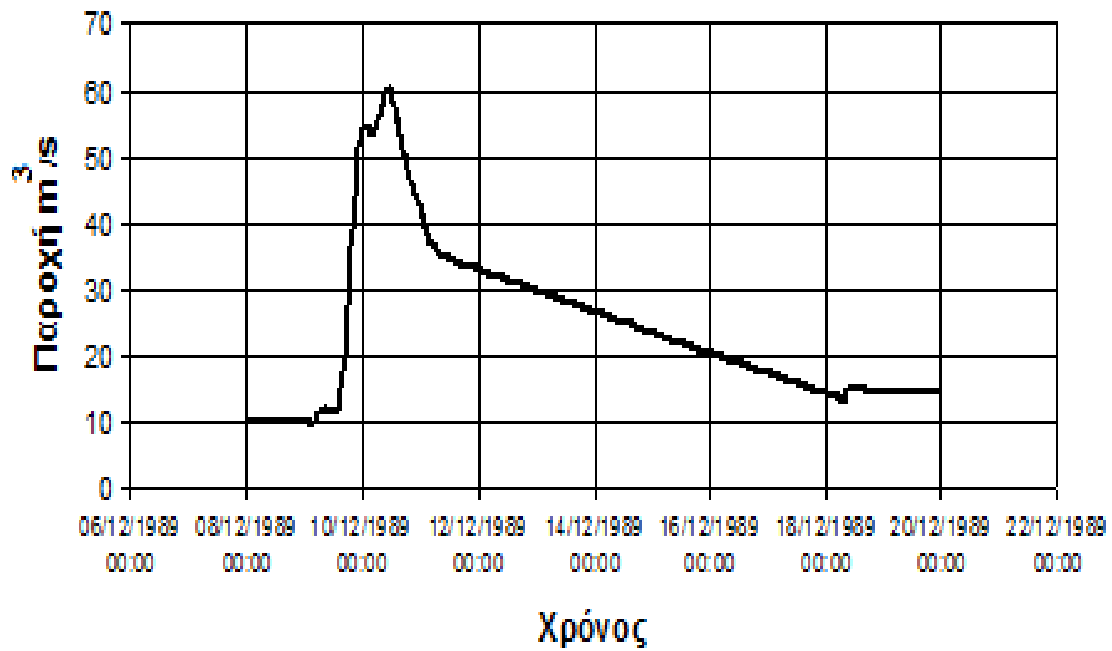
Έχουμε στη διάθεσή μας δεδομένα ημερήσιας στάθμης και παροχής για την Γέφυρα του Αλή Εφέντη (πηγή: ΥΠΕΧΩΔΕ) για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Σταθμηγράφος υπάρχει και στην γέφυρα Μεσσανίου αλλά δυστυχώς τα δεδομένα του είναι ελλιπέστατα ή ακόμα και ανύπαρκτα εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Η χρησιμότητά τους στην διαδικασία της βαθμονόμησης θα ήταν ιδιαίτερα σημαντική. Αποφεύγοντας, λοιπόν, κάποιες ακραίες τιμές στάθμης στην γέφυρα Αλή Εφέντη, επιλέξαμε τα πιο χαρακτηριστικά ζεύγη τιμών, συγκεκριμένα 237 ζεύγη κατά την διάρκεια της περιόδου από τον Αύγουστο του 1951 έως τον Δεκέμβριο του 1981.

Αφού εισάγουμε τα ζεύγη τιμών και καταρτίσουμε την καμπύλη στάθμης – παροχής, με την βοήθεια του προγράμματος EXCEL, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η εξίσωση που συνδέει τις δύο μεταβλητές είναι πολυωνυμική 2^{ου} βαθμού και παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.8.

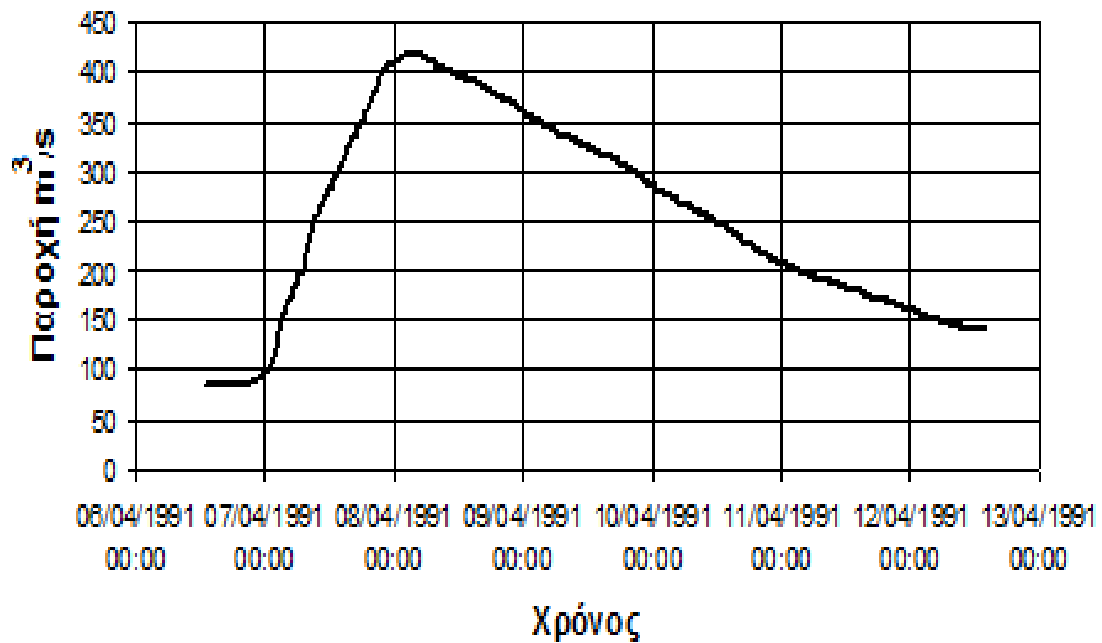


Διάγραμμα 4-8 : Καμπύλη στάθμης – παροχής

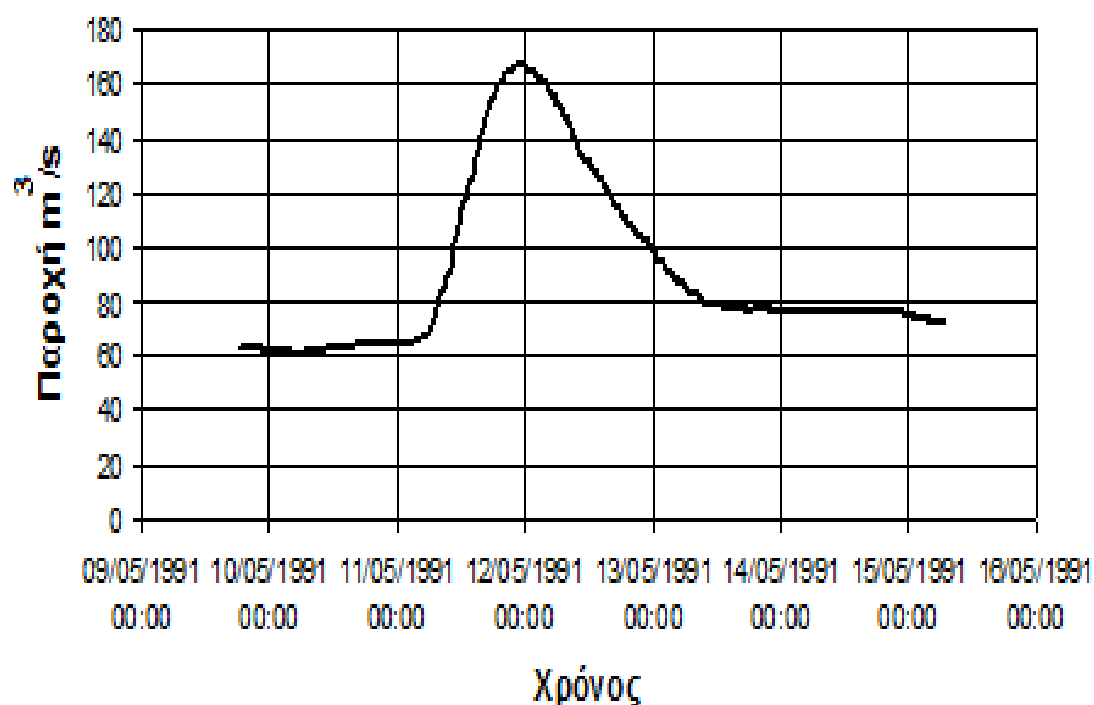
Με βάση λοιπόν την πολυωνυμική εξίσωση αυτή, μπορούμε να μετατρέψουμε όλα τα διαθέσιμα δεδομένα στάθμης σε δεδομένα παροχής. Για τα επιλεγμένα πλημμυρικά επεισόδια, παρουσιάζουμε εδώ τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’.



Διάγραμμα 4-9 : Παρατηρημένο πλημμυρογράφημα στη θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο βροχόπτωσης 7-10 Δεκεμβρίου 1989.



Διάγραμμα 4-10 : Παρατηρημένο πλημμυρογράφημα στη θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο βροχόπτωσης 6-7 Απριλίου 1991.



Διάγραμμα 4-11 : Παρατηρημένο πλημμυρογράφημα στη θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο βροχόπτωσης 9-11 Μαΐου 1991.

4.6 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Το HEC-HMS παρέχει την δυνατότητα επιλογής μιας πληθώρας μαθηματικών προτύπων για την αναπαράσταση των επιμέρους συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου, ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης και την ποσότητα και ποιότητα των δεδομένων εισόδου. Ενώ στο κεφάλαιο 3 είχε γίνει μια συνοπτική αναφορά των διαθέσιμων προτύπων για κάθε συνιστώσα, στο παρόν κεφάλαιο, θα προχωρήσουμε σε μια βαθύτερη ανάλυση αυτών των οποίων επιλέξαμε για όλες τις συνιστώσες και θα παρουσιάσουμε και τον τρόπο εκτίμησης των αρχικών τιμών των παραμέτρων τους. Τα συγκεκριμένα πρότυπα επιλέχθηκαν με γνώμονα την συμβατότητά τους με τις υπάρχουσες συνθήκες της περιοχής μελέτης και την διαθεσιμότητα ή μη, δεδομένων που είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό των παραμέτρων τους.

4.6.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΒΡΟΧΗΣ – ΠΡΟΤΥΠΟ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ (SCS CURVE NUMBER)

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

Διήθηση (infiltration) είναι η διαδικασία με την οποία το νερό εισχωρεί από την επιφάνεια του εδάφους μέσα σε αυτό. Η διαδικασία αυτή συναρτάται άμεσα με την κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος με τρόπο τέτοιο ώστε ο ρυθμός διήθησης να εξαρτάται τόσο από την διαθεσιμότητα του νερού για διήθηση, όσο και από την κατάσταση του εδάφους. Ποσοτικά ο ρυθμός διήθησης είναι προφανώς μεταβλητός, όχι μόνο χωρικά αλλά και χρονικά. Εξαρτάται από την ένταση και διάρκεια των βροχοπτώσεων, την περιεκτικότητα σε υγρασία του επιφανειακού εδαφικού καλύμματος και την παρουσία ή όχι χλωρίδας, την θερμοκρασία, κ.α.

Αναγκαστικά οι μέθοδοι προσδιορισμού των συνολικών ελλειμμάτων δεν μπορεί παρά να είναι εμπειρικές ή ημιεμπειρικές, αφού δεν κάνουν ακριβή θεώρηση των μηχανισμών που τα δημιουργούν. Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε το πρότυπο απωλειών του αριθμού καμπύλης απορροής (CN) της Soil Conservation Service (SCS Curve Number, 1972). Είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα και επιτυχώς δοκιμασμένα πρότυπα στην Αμερική, παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται σε μικρές, αγροτικές, λεκάνες απορροής, είναι εύκολο στην εφαρμογή του και περιλαμβάνει μόνο μία παράμετρο, η οποία είναι συνάρτηση του τύπου εδάφους, της χρήσης γης και της κατάστασης υγρασίας του εδάφους. Επιλέχτηκε αυτή η μέθοδος μεταξύ των άλλων γιατί ο ρυθμός διήθησης δεν παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια της καταιγίδας όπως στη μέθοδο του δείκτη ϕ και επιπλέον περιλαμβάνει μία μόνο παράμετρο που είναι εύκολο να προσδιοριστεί με τη βοήθεια του Σ.Γ.Π ArcView, ενώ οι άλλες μέθοδοι περιλαμβάνουν περισσότερες παραμέτρους που είναι πιο δύσκολο να προσδιοριστούν, λόγω της δυσκολίας στην εύρεση των απαιτούμενων δεδομένων. Τα μειονεκτήματα στην εφαρμογή του είναι ότι δεν

λαμβάνει υπόψη την ένταση της βροχόπτωσης στον υπολογισμό των απωλειών και ότι για μεγάλης διάρκειας βροχές ο ρυθμός διήθησης γίνεται μηδενικός και όχι σταθερός όπως θα ήταν αναμενόμενο.

Η μέθοδος υπολογισμού απωλειών της SCS, στηρίζεται στην υπόθεση ότι ο λόγος των πραγματικών απωλειών προς τις δυνητικές είναι ίσος με τον λόγο της πραγματικής ενεργού βροχής προς την δυνητική, το οποίο εκφράζεται μαθηματικά από την εξίσωση:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad 4.1$$

όπου P_e είναι η αθροιστική ενεργός βροχή, P είναι το αθροιστικό ύψος βροχής, S είναι το μέγιστο πιθανό ύψος απωλειών, F_a είναι το ύψος απωλειών μετά την έναρξη της απορροής και I_a είναι οι αρχικές απώλειες (κατακράτηση και παρεμπόδιση). Η παρεμπόδιση είναι μια συνέπεια της βλάστησης στην λεκάνη που δεν επιτρέπει ένα μέρος της βροχής να φτάσει στο έδαφος. Η κατακράτηση είναι μια συνέπεια των ανωμαλιών του εδάφους όπου παγιδεύεται ένα μέρος της βροχής που αργότερα είτε θα εξατμιστεί είτε θα κατεισδύσει στο έδαφος. Αυτές οι απώλειες συμβαίνουν πριν την έναρξη της απορροής. Με βάση το ισοζύγιο βροχής θα ισχύει ότι:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad 4.2$$

Αν στην εξίσωση 4.2 λύσουμε ως προς F_a και το αντικαταστήσουμε στην εξίσωση 4.1 και ακολούθως λύσουμε ως προς την αθροιστική ενεργό βροχή, τότε προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad 4.3$$

Από παρατηρημένα δεδομένα έχει προκύψει η εκτίμηση ότι:

$$I_a = 0,2S \quad 4.4$$

οπότε η εξίσωση 4.3 απλοποιείται περαιτέρω στην παρακάτω μορφή με μοναδική παράμετρο το S :

$$Pe = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & \alpha\nu \ P > 0.2S \\ 0 & \alpha\nu \ P \leq 0.2S \end{cases} \quad 4.5$$

Οι μέγιστες πιθανές απώλειες S συνδέονται με τον αριθμό καμπύλης CN μέσω της εξίσωσης:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (\text{mm}) \quad 4.6$$

4.6.1.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Το πρότυπο του αριθμού καμπύλης CN της SCS, στην πραγματικότητα περιλαμβάνει μια παράμετρο (τον αριθμό καμπύλης CN) και μια αρχική συνθήκη (τις αρχικές απώλειες I_a). Οι παράμετροι αυτές αντιπροσωπεύουν τους τύπους εδαφών και τις χρήσεις γης στην λεκάνη, καθώς και την προηγούμενη υγρασιακή κατάσταση του εδάφους. Όσον αφορά στους τύπους εδαφών, υπάρχει η κατάταξη στις κατηγορίες A, B, C ή D ανάλογα με τα παρακάτω κριτήρια:

A. Εδάφη με υψηλούς ρυθμούς διήθησης ακόμα κι αν διαβραχούν διεξοδικά (πολύ χαμηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιέχουν πλήρως στραγγιζόμενες άμμους ή χαλίκια.

B. Εδάφη με μέτριους ρυθμούς διήθησης, όπως για παράδειγμα αμμώδης πηλός.

C. Εδάφη με χαμηλούς ρυθμούς διήθησης, όπως είναι τα εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου.

D. Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης (πολύ υψηλό δυναμικό απορροής). Συνήθως περιλαμβάνουν αργιλώδη εδάφη με υψηλή πιθανότητα διόγκωσης ή ρηχά εδάφη πάνω σε σχεδόν αδιαπέρατο υλικό.

(Τεχνική Υδρολογία, Μ.Α Μιμίκου, Ε.Α Μπαλτάς, 2002)

Σχετικά με την προηγούμενη υγρασιακή κατάσταση του εδάφους, η κατηγοριοποίηση έχει ως εξής:

➤ **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 μέρες πριν τη δεδομένη καταιγίδα και το έδαφος είναι σχεδόν κορεσμένο.

(Τεχνική Υδρολογία, Μ.Α Μιμίκου, Ε.Α Μπαλάς, 2002)

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη, την κατηγορία εδάφους και την προηγούμενη υγρασιακή κατάστασή του, μπορούμε κάνοντας χρήση των διαθέσιμων πινάκων χρήσεων γης της περιοχής μελέτης να εντοπίσουμε τα όρια μέσα στα οποία θα βρίσκεται η τιμή του CN. Ο προσδιορισμός του απαιτείται για όλες τις υπολεκάνες της περιοχής. Επειδή όμως όπως είναι φυσικό κάθε υπολεκάνη δεν απαρτίζεται από μία μόνο χρήση γης και τύπο εδάφους, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος αριθμός καμπύλης κάθε υπολεκάνης από την εξής σχέση:

$$CN_{\text{μέσο}} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad 4.7$$

όπου i είναι ο δείκτης των υποδιαίρεσεων κάθε υπολεκάνης με ομοιόμορφη χρήση γης και τύπο εδάφους, A_i είναι το εμβαδό κάθε υποδιαίρεσης και CN_i είναι ο αριθμός καμπύλης κάθε υποδιαίρεσης. Ο υπολογισμός του μέσου αριθμού καμπύλης για κάθε υπολεκάνη με χρήση της εξίσωσης 4.7 έγινε με ανάλυση στο HEC-GeoHMS των ψηφιακών χαρτών χρήσεων γης και την βοήθεια πινάκων με τους αριθμούς καμπύλης για κάθε χρήση (παράρτημα Α).

Στην πράξη ο αριθμός καμπύλης παίρνει τιμές από 35 (εδάφη με την μεγαλύτερη διήθηση) μέχρι 98 (αδιαπέρατες επιφάνειες). Στην περίπτωση όμως που ο μέσος αριθμός καμπύλης, όπως υπολογίζεται από την εξίσωση 4.7, είναι μικρότερος του 40 συνίσταται η εφαρμογή άλλου προτύπου για τον υπολογισμό του όγκου απωλειών.

4.6.2 ΒΑΣΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ – ΠΡΟΤΥΠΟ ΕΚΘΕΤΙΚΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ (EXPONENTIAL RECESSION)

Οι βασικές συνιστώσες ενός υδρογραφήματος είναι η επιφανειακή απορροή (surface runoff), η ενδιάμεση απορροή (interflow) και η βασική απορροή (baseflow). Η συνιστώσα της επιφανειακής απορροής περιλαμβάνει το νερό που ρέει πάνω στην επιφάνεια του εδάφους. Η ενδιάμεση απορροή περιλαμβάνει το νερό που κινείται πλευρικά κάτω από την επιφάνεια του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη και εκδηλώνεται μετά από κάποια απόσταση πάλι στην επιφάνεια ή απευθείας στην κοίτη του υδατορεύματος. Η βασική απορροή περιλαμβάνει το νερό που προέρχεται από τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Η επιφανειακή και ενδιάμεση απορροή αποτελούν την άμεση απορροή (direct runoff).

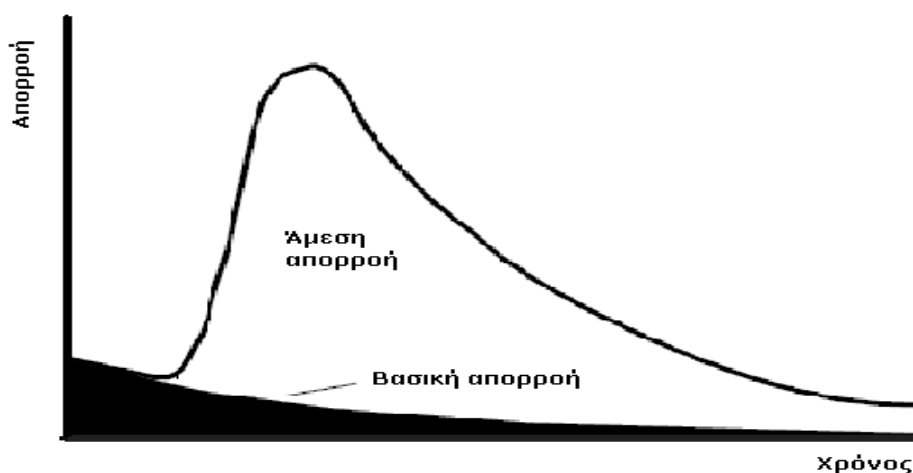
Το σχήμα ενός υδρογραφήματος, που προκαλείται από μια βροχή με σχετικά μικρή διάρκεια και καλύπτει όλη την υδρολογική λεκάνη, έχει κατά κανόνα μια κωδωνοειδή μορφή. Στην αρχή του, εμφανίζεται ένας ανοδικός κλάδος που σημαίνει ότι κατά την διάρκειά του η παροχή του υδατορεύματος αυξάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή και κατόπιν ακολουθεί ένας καθοδικός κλάδος όπου η παροχή μειώνεται συνεχώς και μπορεί να φτάσει και στο μηδέν, εξαρτώμενη από την ύπαρξη ή όχι βασικής απορροής. Η καμπύλη καθόδου αντιπροσωπεύει την αποχώρηση του νερού που έχει αποθηκευτεί στην επιφάνεια της λεκάνης μετά την ουσιαστική διακοπή της βροχής. Το σχήμα της καμπύλης αυτής είναι ανεξάρτητο από τις διακυμάνσεις της εντάσεως της βροχής που προκάλεσε την απορροή και της διηθητικότητας του εδάφους, εξαρτάται δε σχεδόν αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά της κοίτης των υδατορευμάτων και της λεκάνης απορροής. Παρατηρήθηκε πως αν η καμπύλη καθόδου ενός υδρογραφήματος σχεδιαστεί σε ημιλογαριθμικό χαρτί, προκύπτει μια τεθλασμένη γραμμή με ένα διακεκριμένο σημείο αλλαγής της κλίσης (σημείο καμπής - inflection point).

Κατά την διαδικασία μιας υδρολογικής ανάλυσης είναι πολλές φορές αναγκαίο να χωρισθεί ένα υδρογράφημα στις επιμέρους συνιστώσες που το απαρτίζουν. Στην πράξη ένας τέτοιος διαχωρισμός παρουσιάζει πολλά προβλήματα στο να διαχωριστούν με ακρίβεια οι ποσότητες νερού που προέρχονται από τις παραπάνω διαδικασίες. Για τον διαχωρισμό του υδρογραφήματος σε άμεση και βασική απορροή έχουν επινοηθεί διάφορες μέθοδοι λίγο ή πολύ αυθαίρετες. Για την

αναπαράσταση της βασικής απορροής στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκε να εφαρμοστεί το πρότυπο εκθετικής μείωσης (exponential recession method) που περιγράφεται από την εξίσωση:

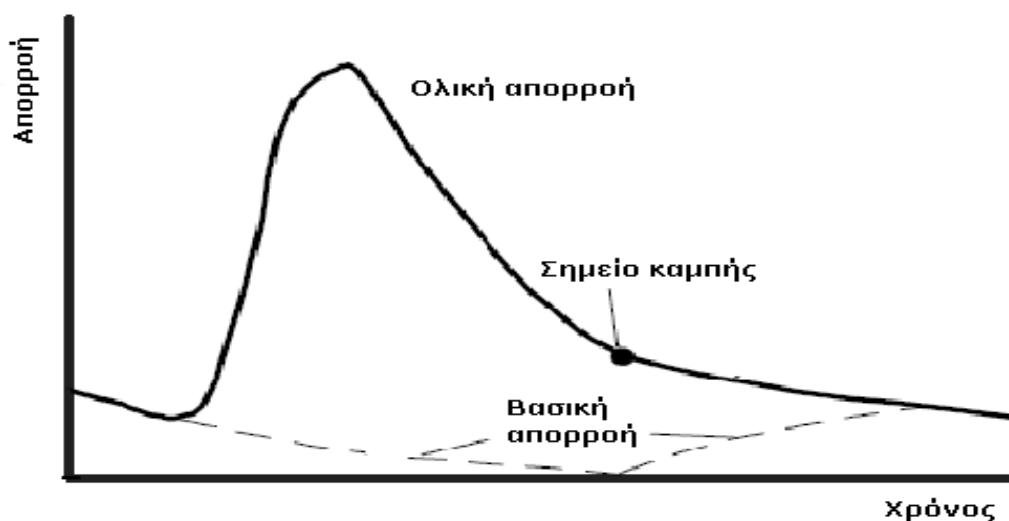
$$Q_t = Q_0 \cdot k^t \quad 4.8$$

όπου Q_0 είναι η αρχική τιμή της βασικής ροής σε χρόνο μηδέν, Q_t είναι η τιμή της βασικής ροής σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή t και k είναι μια σταθερά εκθετικής μείωσης. Η γραφική παράσταση της εξίσωσης 4.8 αποτελεί το μαυρισμένο τμήμα του υδρογραφήματος του διάγραμμα 4-12. Επιλέχθηκε να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος μεταξύ των άλλων γιατί δεν διατηρεί μια σταθερή βασική απορροή, αλλά μεταβάλλεται στη διάρκεια της πλημμύρας και γιατί οι δύο παράμετροι που περιλαμβάνει μπορούν να προσδιοριστούν σχετικά απλά από τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα, όπως θα επεξηγηθεί παρακάτω.



Διάγραμμα 4-12: Διαχωρισμός υδρογραφήματος σε άμεση και βασική απορροή με εφαρμογή του προτύπου εκθετικής μείωσης.

Η εξίσωση 4.8 περιγράφει την βασική απορροή από την έναρξη της προσομοίωσης μέχρι και την χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο σημείο καμπής του υδρογραφήματος. Από την στιγμή αυτή και μετά, μέχρι το τέλος της προσομοίωσης, η μεν ολική απορροή υπολογίζεται από την εξίσωση 4.8, η δε βασική απορροή καθορίζεται ως η ολική απορροή μείον την άμεση απορροή. Όταν η άμεση απορροή γίνει μηδέν τότε η ολική και η βασική απορροή ταυτίζονται όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4-13.



Διάγραμμα 4-13: Αναπαράσταση βασικής απορροής με το πρότυπο εκθετικής μείωσης στο HEC-HMS.

4.6.2.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Το πρότυπο εκθετικής μείωσης της βασικής απορροής έχει δυο παραμέτρους οι οποίες πρέπει να προσδιοριστούν και μια αρχική συνθήκη. Η αρχική συνθήκη είναι η παροχή Q_0 και είναι ίση με την παροχή του παρατηρημένου υδρογραφήματος στην έναρξη της προσομοίωσης.

Η πρώτη παράμετρος είναι η παροχή στο σημείο καμπής του υδρογραφήματος. Όπως προαναφέραμε, το σημείο καμπής μπορεί να προσδιοριστεί αν χαράξουμε τον καθοδικό κλάδο του υδρογραφήματος σε ημιλογαριθμικό χαρτί, οπότε και θα προκύψει μια τεθλασμένη γραμμή με ένα διακεκριμένο σημείο αλλαγής της κλίσης. Η παροχή που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό είναι και η τιμή της πρώτης παραμέτρου.

Η δεύτερη παράμετρος είναι η σταθερά εκθετικής μείωσης k η οποία μπορεί να πάρει τιμές από 0.00011 μέχρι 1. Τιμές κοντά στην μονάδα συνεπάγονται ήπια κλίση της καμπύλης βασικής απορροής, ενώ μικρές τιμές του k συνεπάγονται απότομη κλίση της καμπύλης βασικής απορροής. Μια τιμή του $k = 1$ σημαίνει πως η βασική απορροή θα είναι σταθερή και ίση με Q_0 , πράγμα που συνεπάγεται ότι η βασική απορροή καθορίζεται από κάποιον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα. Η σταθερά

εκθετικής μείωσης μπορεί να προσδιοριστεί ως ο μέσος όρος των λόγων των παροχών, πριν την έναρξη της άμεσης απορροής, με χρονική διαφορά μίας μέρας.

4.6.3 ΑΜΕΣΗ ΑΠΟΡΡΟΗ – ΣΥΝΘΕΤΙΚΟ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑ SNYDER (SNYDER UNIT HYDROGRAPH)

Στο υποκεφάλαιο 4.6.1 αναλύθηκε το πρότυπο υπολογισμού των απωλειών της βροχόπτωσης και έμμεσα με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ο όγκος της ενεργού βροχόπτωσης, η οποία θα προκαλέσει την άμεση απορροή της λεκάνης. Με τα μοντέλα υπολογισμού της άμεσης απορροής ουσιαστικά καθορίζεται η χρονική κατανομή του όγκου αυτού στην έξοδο της λεκάνης απορροής. Πιο συγκεκριμένα προσδιορίζεται ο χρόνος και η τιμή της παροχής αιχμής, η διάρκεια της άμεσης απορροής και ο χρόνος υστέρησης της άμεσης απορροής που ορίζεται ως η χρονική διαφορά ανάμεσα στο κέντρο βάρους της ενεργού βροχής και της παροχής αιχμής.

Υπάρχουν δυο ειδών μαθηματικά πρότυπα για τον υπολογισμό του άμεσου υδρογραφήματος. Αυτά που στηρίζονται σε θεμελιώδεις εξισώσεις της υδραυλικής, τα λεγόμενα φυσικής βάσης, όπως το πρότυπο κινηματικού κύματος και αυτά που στηρίζονται στην θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος (ΜΥ). Το πρότυπο του κινηματικού κύματος απαιτεί την γνώση πολλών υδραυλικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου και για τον λόγο αυτό είναι πολύπλοκο στην χρήση του και μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα όταν δεν υπάρχουν τα απαιτούμενα δεδομένα. Από την άλλη τα πρότυπα που στηρίζονται στο μοναδιαίο υδρογράφημα είναι πολύ πιο απλά στην εφαρμογή τους και παρέχουν αρκετά καλές προσεγγίσεις των παρατηρημένων υδρογραφημάτων, αλλά εμπεριέχουν ορισμένες απλουστεύσεις και περιορισμούς, που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

4.6.3.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΤΗΝ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ

Κατά τον Sherman μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το άμεσο υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή, συγκεκριμένης διάρκειας, ύψους 10mm, που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην λεκάνη απορροής και έχει σταθερή ένταση.

Βασικές αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι η αρχή της αναλογίας και η αρχή της επαλληλίας. Σύμφωνα με την πρώτη δύο ενεργές βροχές ίσης διάρκειας αλλά διαφορετικών εντάσεων, προκαλούν υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση και με παροχές σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με τον λόγο των εντάσεων. Η αρχή αυτή είναι άμεσα εξαρτώμενη από την γραμμικότητα της λεκάνης απορροής, που μεταφράζεται στο ότι διπλάσιος όγκος ενεργού βροχής θα δώσει διπλάσιο όγκο άμεσης απορροής. Σύμφωνα με την δεύτερη αρχή, το υδρογράφημα που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις έχει παροχές σε κάθε χρονική στιγμή, το άθροισμα των παροχών των επιμέρους υδρογραφημάτων.

Πέρα από τις δύο βασικές αρχές, η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος βασίζεται και στις εξής παραδοχές:

- Σε μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής ενεργές βροχές ίσης διάρκειας αλλά με διαφορετική ένταση, δίνουν άμεσα υδρογραφήματα με την ίδια χρονική βάση.
- Σε μια συγκεκριμένη λεκάνη η άμεση απορροή που προκαλείται από μια συγκεκριμένη βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες ή τις επόμενες βροχές.
- Η κατάσταση της λεκάνης απορροής παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με τον χρόνο.

Σύμφωνα με τους Chow, Maidment and Mays (1988) τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα μπορούν να ενταχθούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Εκείνα που σχετίζουν τα χαρακτηριστικά του ΜΥ, όπως η παροχή και ο χρόνος αιχμής, με τα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το ΜΥ του Snyder.
2. Εκείνα που βασίζονται σε ένα αδιάστατο ΜΥ. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το ΜΥ της SCS.

- Εκείνα που βασίζονται σε μια εννοιολογική λογιστική για την αποθηκευτική ικανότητα της λεκάνης. Στην κατηγορία αυτή ανήκει το ΜΥ του Clark.

Στην παρούσα μελέτη επιλέχτηκε να εφαρμοστεί το συνθετικό ΜΥ του Snyder, το οποίο έχει προκύψει από αναλύσεις μεγάλου αριθμού βροχοπτώσεων στην περιοχή των Απαλλαχίων στην Β. Αμερική και χρησιμοποιείται ευρύτατα.

Η μέθοδος αυτή προσδιορίζει την χρονική υστέρηση t_p , την παροχή αιχμής Q_p , τον χρόνο βάσης T , καθώς και τα πλάτη του ΜΥ W_{50} και W_{75} στον χρόνο που αντιστοιχεί στο 50% και 75% της αιχμής, λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής. Οι εξισώσεις που προσδιορίζουν τα μεγέθη αυτά είναι:

$$\begin{aligned} t_p &= 0.75C_t(L_m \cdot L_c)^{0.3} \\ Q_p &= 2.75 \frac{C_p \cdot A}{t_p} \\ T &= 3 + 3 \frac{t_p}{24} \end{aligned} \quad 4.9$$

όπου,

- t_p = χρόνος υστέρησης της λεκάνης σε ώρες
- C_t = συντελεστής που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και παίρνει τιμές από 1.80 έως 2.20, με μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν σε λεκάνες με μικρές κλίσεις
- L_m = μήκος κύριου υδατορεύματος από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης μέχρι την έξοδο σε km
- L_c = μήκος κύριου υδατορεύματος από το πλησιέστερο σημείο στο κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδο σε km
- Q_p = παροχή αιχμής σε m^3/sec
- C_p = συντελεστής που αντιπροσωπεύει τις συνθήκες μεταφοράς του πλημμυρικού κύματος και της αποθήκευσης της λεκάνης και κυμαίνεται από 0.4 έως 0.8, με μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν σε λεκάνες με μεγάλες κλίσεις
- A = έκταση της λεκάνης απορροής σε km^2
- T = η χρονική βάση του υδρογραφήματος σε ημέρες

Η διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης t_R συνδέεται με την χρονική υστέρηση t_p με την σχέση:

$$t_R = t_p / 5.5 \quad 4.10$$

Αν το ζητούμενο συνθετικό ΜΥ έχει διάρκεια t_r μεγαλύτερη από την t_R τότε ο χρόνος υστέρησης διορθώνεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$t'_p = t_p + \frac{t_r - t_R}{4} \quad 4.11$$

Η διορθωμένη τιμή του χρόνου υστέρησης πρέπει να αντικατασταθεί στις εξισώσεις 4.9 για να υπολογιστούν οι διορθωμένες τιμές των Q'_p και T' . Με τις διορθωμένες τιμές μπορούν πλέον να υπολογιστούν τα πλάτη W_{50} και W_{75} του ΜΥ με τις εξής εξισώσεις:

$$W_{50} = \frac{2.143}{\left(\frac{Q'_p}{A}\right)^{1.08}} \quad 4.12$$

$$W_{75} = \frac{1.225}{\left(\frac{Q'_p}{A}\right)^{1.08}} \quad 4.13$$

Με τον υπολογισμό όλων των πιο πάνω μεγεθών, προσδιορίζονται επτά σημεία του συνθετικού ΜΥ και με αυτά γίνεται η χάραξή του.

4.6.3.2 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Οι παράμετροι που απαιτούνται από το HEC-HMS για τον καθορισμό του συνθετικού ΜΥ κατά Snyder είναι ο χρόνος υστέρησης και ο συντελεστής C_p . Ο χρόνος υστέρησης υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 4.9 για κάθε υπολεκάνη της υπό μελέτη περιοχής. Τα χαρακτηριστικά μήκη L_m και L_c έχουν προσδιοριστεί μέσω του Σ.Γ.Π ArcView ενώ ο συντελεστής C_i προσδιορίζεται με την διαδικασία της ρύθμισης. Όσον αφορά την τιμή του συντελεστή C_p επειδή δεν υπάρχει συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού του, προσδιορίζεται και αυτός καλύτερα μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης του ομοιώματος, λαμβάνοντας υπόψη πάντα τους περιορισμούς στο πεδίο τιμών.

4.6.4 ΔΙΟΔΕΥΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ - MUSKINGUM

Ένα από τα συνηθέστερα προβλήματα στην επιστήμη της υδρολογίας είναι ο χωροχρονικός προσδιορισμός του πλημμυρικού κύματος, καθώς αυτό μετακινείται μέσα σε τμήμα ποταμού ή σε ταμιευτήρα. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με τεχνικές διόδευσης πλημμύρας. Στα φυσικά ποτάμια το πλημμυρικό κύμα, καθώς κινείται από θέση σε θέση, υφίσταται διάφορες αλλοιώσεις τόσο ποιοτικές όσο και ποσοτικές. Οι διάφορες τεχνικές διόδευσης προσπαθούν να βρουν αυτές τις αλλοιώσεις σε σχέση με τα γενεσιουργά τους αίτια, κατά την διάδοση του κύματος στο χώρο και στο χρόνο. Οι περισσότερες από τις αλλοιώσεις του κύματος προκαλούνται από τις ανωμαλίες της κοίτης και την αποθήκευση του νερού στο τμήμα του ποταμού (Μιμίκου, 1990). Στην περίπτωση της διόδευσης κύματος σε τμήμα ποταμού, είναι συνήθως γνωστό το υδρογράφημα σε μια διατομή του ποταμού και αναζητείται το υδρογράφημα σε μια διατομή κατάντη.

Οι μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της διόδευσης πλημμύρας σε τμήμα ποταμού διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις υδραυλικές και τις υδρολογικές.

Οι υδραυλικές μέθοδοι διόδευσης χρησιμοποιούν τις θεμελιώδεις εξισώσεις ασταθούς ροής σε ανοιχτούς αγωγούς (εξισώσεις Saint Venant) που είναι η εξίσωση συνέχειας και η εξίσωση διατήρησης της ορμής. Η επίδραση της αποθηκευτικής ικανότητας του ποταμού πάνω στο πλημμυρικό κύμα περιγράφεται από την εξίσωση συνέχειας, ενώ η επίδραση των ανωμαλιών της κοίτης με την εξίσωση διατήρησης της ορμής. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά απαιτεί πολλά και αξιόπιστα δεδομένα και μεγάλο υπολογιστικό φόρτο. Τα μειονεκτήματα αυτά αντιμετωπίζονται με την χρήση των υδρολογικών μεθόδων διόδευσης. Όλες οι μέθοδοι διόδευσης σε ποτάμι, από μια θέση A σε μια άλλη θέση B κατάντη, βασίζονται στην απλοποιημένη από τον McCarthy (1938) εξίσωση της συνέχειας:

$$I - Q = dS / dt \quad 4.14$$

όπου I είναι η εισροή στο τμήμα A-B του ποταμού, Q η εκροή από το τμήμα του ποταμού και dS/dt η μεταβολή της αποθηκευτικότητας στο τμήμα του ποταμού.

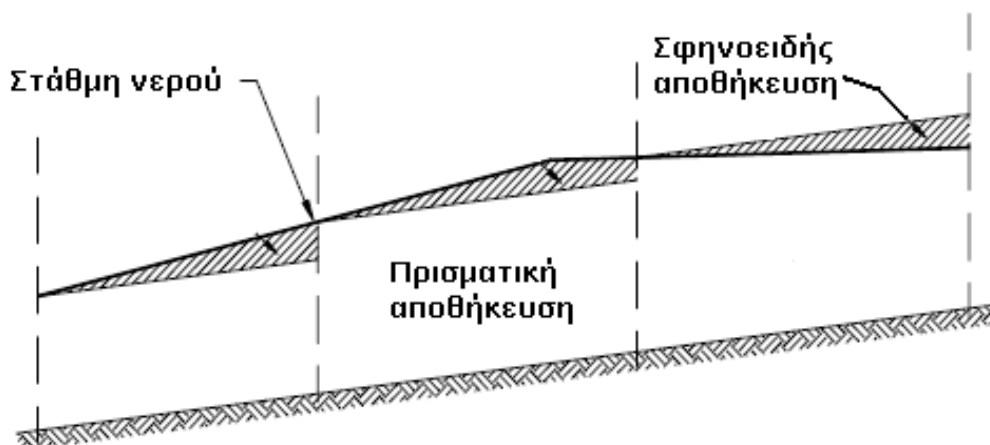
Η αιχμή του πλημμυρογραφήματος εισόδου είναι πάντα μεγαλύτερη από την αιχμή του πλημμυρογραφήματος εξόδου όταν δεν υπάρχει πλευρική εισροή. Αυτή η

μείωση της αιχμής αντισταθμίζεται με την αύξηση της διάρκειας του πλημμυρογραφήματος, ώστε ο συνολικός όγκος που αντιπροσωπεύεται από το εμβαδό κάτω από τις καμπύλες των πλημμυρογραφήματων εισόδου και εξόδου να είναι ίσος, με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν απώλειες.

Οι υδρολογικές μέθοδοι συσχετίζουν την αποθηκευτικότητα με την παροχή εισόδου και εξόδου, με μια γενικότερη σχέση της μορφής:

$$S = \frac{b}{a} [xI^{m/n} + (1-x)Q^{m/n}] \quad 4.15$$

όπου οι συντελεστές a , b , m , n προκύπτουν από γραμμική παλινδρόμηση της παροχής και της αποθηκευτικότητας σε σχέση με την στάθμη του ποταμού. Όπως μπορεί να διαπιστώσει κανείς από την εξίσωση 4.15 η αποθηκευτικότητα εξαρτάται συγχρόνως από την εισροή και την εκροή και στηρίζεται στον διαχωρισμό της σε πρισματική και σφηνοειδή, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3. Η πρισματική αποθήκευση θεωρείται συνάρτηση μόνο της εκροής, ενώ η σφηνοειδής οφείλεται στη διαφορά εισροής και εκροής και είναι συνάρτηση αυτής της διαφοράς.



Εικόνα 4.3: Διαχωρισμός σφηνοειδούς και πρισματικής αποθήκευσης σε τμήμα ποταμού

Το πρότυπο διόδευσης της πλημμύρας που εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη είναι η μέθοδος Muskingum. Η μέθοδος αυτή επιλέχτηκε επειδή δεν απαιτεί την γνώση διατομών του ποταμού και του συντελεστή τραχύτητας Manning και γιατί

οι δυο παράμετροι που περιλαμβάνει μπορούν να προσδιοριστούν είτε από παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα είτε ακόμη και μέσω της βαθμονόμησης.

Σύμφωνα με την μέθοδο Muskingum, η συνολική αποθήκευση του υδατορεύματος θεωρείται ίση με το άθροισμα της πρισματικής και της σφηνοειδούς αποθήκευσης, που σύμφωνα με τον McCarthy (1938) μπορεί να απλοποιηθεί στην εξής γραμμική εξίσωση:

$$S = S_{\text{πρισμα}} + S_{\text{σφην}} = K[xI + (1-x)O] \quad 4.16$$

Αν εφαρμόσουμε την εξίσωση συνέχειας (4.14) στο τμήμα του υδατορεύματος που μας ενδιαφέρει με την μορφή πεπερασμένων διαφορών προκύπτει:

$$\left(\frac{I_{t-1} + I_t}{2}\right) - \left(\frac{O_{t-1} + O_t}{2}\right) = \left(\frac{S_t - S_{t-1}}{\Delta t}\right) \quad 4.17$$

Με την βοήθεια της εξίσωσης 4.17 η εξίσωση 4.16 μπορεί να λυθεί ως προς τον άγνωστο όρο O_t και να πάρει την γενική μορφή της εξίσωσης Muskingum:

$$O_t = \left(\frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}\right) I_t + \left(\frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}\right) I_{t-1} + \left(\frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t}\right) O_{t-1} \quad 4.18$$

Η εξίσωση 4.18 είναι μια αναδρομική σχέση που συνδέει την παροχή εξόδου μιας χρονικής στιγμής t με την παροχή εξόδου την προηγούμενη χρονική στιγμή $t-1$ και τις παροχές εισόδου τις χρονικές στιγμές t και $t-1$.

4.6.4.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο πρότυπο Muskingum και πρέπει να προσδιοριστούν είναι το K και το x . Η παράμετρος K είναι μια σταθερά με διαστάσεις χρόνου που εκφράζει τον χρόνο που χρειάζεται το πλημμυρικό κύμα για να διανύσει το συγκεκριμένο τμήμα του υδατορεύματος και είναι περίπου ίσο με την χρονική διαφορά των αιχμών των πλημμυρογραφημάτων εισόδου και εξόδου. Στην περίπτωση που τα πλημμυρογραφήματα δεν είναι γνωστά τότε η τιμή του K μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$K = \frac{L}{V_w} \quad 4.19$$

όπου V_w η μέση ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος και L το μήκος του υδατορεύματος. Η ταχύτητα του κύματος μπορεί να υπολογιστεί από τον νόμο του Seddon:

$$V_w = \frac{1}{B} \frac{dQ}{dy} \quad 4.20$$

όπου B είναι το πλάτος του υδατορεύματος στην ελεύθερη στάθμη και dQ/dy είναι η κλίση της καμπύλης στάθμης – παροχής σε μια αντιπροσωπευτική διατομή. Εναλλακτικά το εγχειρίδιο EM 1110-2-1417 της SCS προτείνει η ταχύτητα του κύματος να είναι 1.33-1.67 φορές την μέση ταχύτητα του υδατορεύματος, η οποία μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση του Manning για μια αντιπροσωπευτική παροχή του πλημμυρογραφήματος εισόδου.

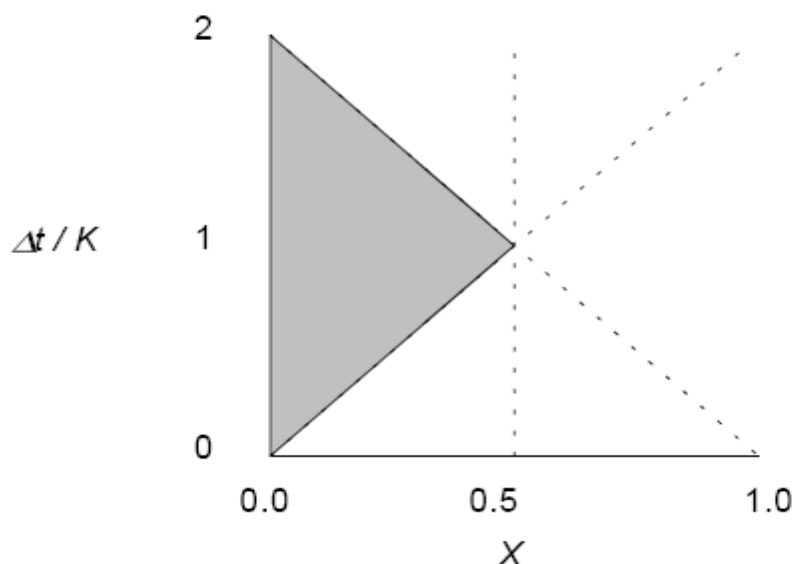
Η παράμετρος χ ονομάζεται συντελεστής αποθήκευσης και είναι ένα αδιάστατο μέγεθος που εκφράζει την εξασθένηση του πλημμυρικού κύματος. Παίρνει τιμές από 0 έως 0.5 με τις μεγάλες τιμές να αντιστοιχούν σε μικρή εξασθένηση του κύματος και συνεπώς σχεδόν ίσες παροχές αιχμής των πλημμυρογραφημάτων εισόδου και εξόδου. Αν η αποθηκευτικότητα του υδατορεύματος καθορίζεται αποκλειστικά από τις κατάντη συνθήκες, όπως στην περίπτωση ενός ταμειυτήρα, η τιμή του χ είναι μηδέν. Ο Chow (1969) προτείνει για τον υπολογισμό του χ την εξίσωση:

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q_o}{BS_o c \Delta x} \right) \quad 4.21$$

όπου C είναι η μέση ταχύτητα του πλημμυρικού κύματος, Q_o είναι μια μέση παροχή του πλημμυρογραφήματος εισόδου μεταξύ της βασικής παροχής και της παροχής αιχμής, Δx είναι το μήκος του υδατορεύματος και S_o είναι η κλίση της γραμμής ενέργειας ή του πυθμένα.

Εκτός από τον περιορισμό του χ να είναι μεταξύ 0 και 0.5, υπάρχουν και άλλοι περιορισμοί που αναφέρονται στο χρονικό και χωρικό βήμα της αριθμητικής μεθόδου Muskingum και διασφαλίζουν την ακρίβεια και ευστάθεια της λύσης. Με τη

διόδευση Muskingum, το χωρικό βήμα Δx , καθορίζεται έμμεσα από τον αριθμό βημάτων στα οποία διαιρείται το υδατόρευμα για τη διόδευση. Όπως και με άλλα πρότυπα, το $\Delta x / \Delta t$ επιλέγεται ώστε να προσεγγίζει τη μέση ταχύτητα του κύματος για το χωρικό βήμα Δx . Με το πρότυπο Muskingum, η ταχύτητα του κύματος είναι L / K και έτσι ο αριθμός βημάτων πρέπει να είναι περίπου $K / \Delta t$. Οι τιμές του K και του χ πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε ο συνδυασμός τους να εμπίπτει μέσα στη σκιασμένη περιοχή που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4-14, ώστε η λύση που θα προκύψει να είναι ευσταθής. Η σκιασμένη περιοχή του σχήματος περιγράφεται από τις εξισώσεις: $\Delta t / K = 2\chi$ και $\Delta t / K = 2(1-\chi)$.



Διάγραμμα 4-14: Συνδυασμός των τιμών K , χ και Δt ώστε η λύση του προβλήματος διόδευσης που θα προκύψει με την μέθοδο Muskingum να είναι ευσταθής.

4.7 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

4.7.1 ΓΕΝΙΚΑ - ΤΕΧΝΙΚΕΣ

Κανένα ομοίωμα δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περίπτωση εάν οι τιμές όλων των συντελεστών που περιέχονται σε αυτό δεν είναι γνωστές. Η

διαδικασία βάση της οποίας υπολογίζονται οι τιμές αυτών των συντελεστών ώστε οι εκτιμημένες τιμές των υδρολογικών μεταβλητών να ταυτίζονται με τις παρατηρηθείσες τιμές των μεταβλητών, καλείται βαθμονόμηση. Η καλή βαθμονόμηση του ομοιώματος είναι μια απόδειξη ότι το ομοίωμα είναι σε θέση να αναπαράγει παρατηρημένες τιμές διαφόρων υδρολογικών μεταβλητών. Η πρόβλεψη της απόκρισης ενός υδρολογικού συστήματος με την εφαρμογή ενός μη-βαθμονομημένου ομοιώματος, δεν είναι έγκυρη και εμπεριέχει μεγάλη πιθανότητα εσφαλμένων προβλέψεων. Γενικά, η καλή βαθμονόμηση του ομοιώματος μπορεί να επιτευχθεί με την συνεχή προσαρμογή των υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων του ομοιώματος, μέχρι η διαφορά μεταξύ των εκτιμημένων και των μετρημένων μεταβλητών κατάστασης του ομοιώματος να είναι ικανοποιητικά μικρή.

Η διαδικασία προσαρμογής βασίζεται συνήθως στην τεχνική της δοκιμής - σφάλματος (trial and error approach). Μερικά αριθμητικά ομοιώματα έχουν εξοπλιστεί με διαδικασίες αυτόματης βαθμονόμησης. Το πεδίο τιμών των υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων για την βαθμονόμηση, πρέπει να περιοριστεί σε λογικές τιμές, οι οποίες προσδιορίζονται από συγκεκριμένα στοιχεία πεδίου. Η δυσκολία στην επίτευξη μιας καλής βαθμονόμησης προέρχεται από το γεγονός ότι οι οριακές συνθήκες και οι τιμές των υδρολογικών και υδραυλικών παραμέτρων υπόκεινται πάντα σε κάποιο βαθμό αβεβαιότητας.

Η βαθμονόμηση του ομοιώματος μπορεί να αξιολογηθεί μέσω της οπτικής σύγκρισης και των στατιστικών μέτρων. Η οπτική σύγκριση περιλαμβάνει την γραφική απεικόνιση των εκτιμημένων έναντι των παρατηρημένων τιμών. Τα στατιστικά μέτρα αποτελούνται από δείκτες επίδοσης οι οποίοι και θα αναλυθούν παρακάτω.

Η βαθμονόμηση με την μέθοδο δοκιμής - σφάλματος, περιλαμβάνει την προσαρμογή με το χέρι των παραμέτρων ώστε να ταιριάζουν τα εκτιμημένα αποτελέσματα με τα παρατηρημένα ιστορικά στοιχεία. Η διαδικασία βαθμονόμησης με αυτή τη μέθοδο μπορεί να είναι πολύ επίπονη και χρονοβόρα ειδικά όταν μεταβάλλονται ταυτόχρονα πολλές παράμετροι, αλλά αποτελεί και ένα τρόπο εξάσκησης για τους νέους χειριστές ομοιωμάτων. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η χαμηλή αποδοτικότητα και η έλλειψη τυποποιημένων μέτρων αξιολόγησης της απόδοσης της βαθμονόμησης.

Ενώ η βαθμονόμηση με την μέθοδο δοκιμής - σφάλματος παραμένει η πιο συνηθισμένη μέθοδος βαθμονόμησης για ομοιώματα όλων των ειδών, πολλές αυτόματες ή ημιαυτόματες, άμεσες ή έμμεσες τεχνικές είναι διαθέσιμες για την επίλυση ενός αντίστροφου προβλήματος στα διάφορα υδρολογικά συστήματα. Η αυτόματη, άμεσα ή έμμεσα, βαθμονόμηση ενός ομοιώματος, απαιτεί τη συγκρότηση της αντικειμενικής συνάρτησης, την ανάπτυξη ενός αλγόριθμου βελτιστοποίησης, τη θέσπιση των περιοριστικών διατάξεων και βεβαίως την χρήση των παρατηρημένων δεδομένων ως στόχους της βαθμονόμησης.

Η κύρια δυσκολία στην βαθμονόμηση ενός ομοιώματος έγκειται στην ύπαρξη πληθώρας συνδυασμών των τιμών των παραμέτρων, οι οποίες παράγουν εξίσου καλές αποκρίσεις της λεκάνης απορροής. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την προγνωστική ικανότητα του ομοιώματος, που γίνεται πιο έντονη όσο αυξάνεται το πλήθος των παραμέτρων. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι καθοριστική η εμπειρία του μελετητή.

Παρόλο που το πρόβλημα αυτό απασχολεί την επιστημονική κοινότητα για σχεδόν τρεις δεκαετίες, μόλις τα τελευταία δέκα χρόνια η έρευνα έχει στραφεί προς την επίτευξη μεθόδων για την αντιμετώπιση του προβλήματος. Την λύση αποτελεί η διαμόρφωση διανυσματικών αντικειμενικών συναρτήσεων με χρήση πολλαπλών μέτρων καλής προσαρμογής και ακολούθως την εφαρμογή πολυκριτηριακών τεχνικών βελτιστοποίησης. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η εύρεση διαφόρων συνδυασμών παραμέτρων που αν και δεν βελτιστοποιούν όλα τα κριτήρια ταυτόχρονα, παρέχουν λύσεις καθεμία από τις οποίες υπερτερεί τουλάχιστον ως προς ένα κριτήριο σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, οι τιμές κάποιων παραμέτρων στα επιμέρους μαθηματικά πρότυπα του ομοιώματος πρέπει να καθοριστούν μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκαν και οι δυο τεχνικές βαθμονόμησης: δοκιμής-σφάλματος με το χέρι και αυτοματοποιημένη με εφαρμογή ενός αλγόριθμου βελτιστοποίησης που προσφέρει το HEC-HMS. Και στις δυο περιπτώσεις η βαθμονόμηση του ομοιώματος έγινε με βάση παρατηρημένες παροχές στη θέση 'γέφυρα Αλή Εφέντη', χρησιμοποιώντας δύο από τα τρία πλημμυρικά επεισόδια, που προσομοιώθηκαν συνολικά, το επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989 και Μαΐου 1991. Η τεχνική δοκιμής-σφάλματος εφαρμόστηκε στις παραμέτρους C_p και C_t του μοναδιαίου υδρογραφήματος Snyder, στις παραμέτρους K

και χ του προτύπου διόδευσης Muskingum και στον αριθμό καμπύλης CN στο πρότυπο απωλειών κατά SCS. Η επιλογή αυτή της χρονοβόρου τεχνικής έγινε με σκοπό στο τέλος να προκύψουν οι βέλτιστες τιμές παραμέτρων για το ομοίωμα, οι οποίες θα είναι σταθερές για κάθε υπολεκάνη και δεν θα εξαρτώνται από τα διαφορετικά παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους του ομοιώματος, όπως η παροχή στο σημείο καμπής και η σταθερά εκθετικής μείωσης στο πρότυπο βασικής απορροής και οι αρχικές απώλειες στο πρότυπο απωλειών, εφαρμόστηκε η αυτόματη βαθμονόμηση για κάθε πλημμυρογράφημα χωριστά, χρησιμοποιώντας ως αλγόριθμο βελτιστοποίησης τον αλγόριθμο univariate gradient και ως αντικειμενική συνάρτηση το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών (sum squared residuals).

4.7.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ UNIVARIATE GRADIENT

Ο αλγόριθμος univariate gradient είναι ένας αλγόριθμος μη-γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος με μια επαναληπτική διαδικασία εκτελεί διαδοχικές διορθώσεις στην παράμετρο που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Αν δηλαδή χ^k είναι η τιμή της παραμέτρου που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε στην επανάληψη k τότε η τιμή της στην επανάληψη $k+1$ θα είναι $\chi^{k+1} = \chi^k + \Delta\chi^k$ όπου ο όρος $\Delta\chi^k$ είναι η διόρθωση της παραμέτρου στην $k+1$ επανάληψη. Στόχος αυτού του αλγόριθμου είναι να επιλέγεται κάθε φορά ένα $\Delta\chi^k$ ώστε η τιμή της παραμέτρου που θα υπολογίζεται κάθε φορά να ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

Ο αλγόριθμος univariate gradient όπως εμπεριέχεται στο HEC-HMS στηρίζεται στην μέθοδο Newton, σύμφωνα με την οποία η αντικειμενική συνάρτηση αναπτύσσεται σε μια δευτέρου βαθμού σειρά Taylor:

$$f(x^{k+1}) = f(x^k) + (x^{k+1} - x^k) \frac{df(x^k)}{dx} + \frac{(x^{k+1} - x^k)^2}{2} \frac{d^2f(x^k)}{dx^2} \quad 4.22$$

όπου $f(x^{k+1})$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση στην επανάληψη $k+1$ και $df(*)/dx$ και $d^2f(*)/dx^2$ είναι η πρώτη και δεύτερης τάξης παράγωγοι της αντικειμενικής συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται όταν η πρώτη της παράγωγος είναι μηδέν. Αν παραγωγίσουμε λοιπόν την εξίσωση 4.22 και θέσουμε

την παράγωγο ίση με μηδέν, αγνοώντας τους όρους τρίτης τάξης, προκύπτει η εξίσωση:

$$0 = \frac{df(x^k)}{dx} + (x^{k+1} - x^k) \frac{d^2 f(x^k)}{dx^2} \quad 4.23$$

όπου η διαφορά $x^{k+1} - x^k$ είναι το ζητούμενο Δx^k που υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta x^k = - \frac{\frac{df(x^k)}{dx}}{\frac{d^2 f(x^k)}{dx^2}} \quad 4.24$$

Οι παράγωγοι στην εξίσωση 4.23 υπολογίζονται αριθμητικά και έτσι προκύπτει έπειτα από διαδοχικές επαναλήψεις η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου χ που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Αν οι παράμετροι για βελτιστοποίηση είναι περισσότερες από μια, ο αλγόριθμος εφαρμόζεται διαδοχικά σε όλες κρατώντας την τιμή των υπολοίπων σταθερή. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η μείωση στην αντικειμενική συνάρτηση να είναι μικρότερη από 1%. Περισσότερες πληροφορίες για την εφαρμογή του αλγορίθμου univariate gradient υπάρχουν στο τεχνικό εγχειρίδιο του προγράμματος (Technical Reference Manual – HEC-HMS).

4.7.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ 'ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ'

Όσον αφορά στην αντικειμενική συνάρτηση, το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών (sum squared residuals) το οποίο χρησιμοποιούμε, είναι μια συχνά χρησιμοποιούμενη αντικειμενική συνάρτηση για βαθμονόμηση κάποιου ομοιώματος. Συγκρίνει όλες τις συντεταγμένες των υδρογραφημάτων, αλλά επειδή υπολογίζει τα τετράγωνα των διαφορών μεταξύ παρατηρημένου και εκτιμημένου υδρογραφήματος, μια διαφορά 10 μονάδων προκαλεί 100 φορές χειρότερο αποτέλεσμα από ότι μια διαφορά 1 μονάδας. Η συνάρτηση αυτή αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης των όγκων, των παροχών αιχμής αλλά και των χρόνων αιχμής των δυο υδρογραφημάτων και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε στην παρούσα μελέτη έναντι των άλλων αντικειμενικών συναρτήσεων που προσφέρει το HEC-HMS.

4.7.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ

Ως στατιστικοί δείκτες επίδοσης του ομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν:

- η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE)
- ο συντελεστής Nash – Sutcliffe (R^2)
- το απόλυτο σφάλμα στον συνολικό όγκο (b) και
- μια ποσοστιαία έκφραση σφάλματος για την παροχή αιχμής (PE).

Αναλυτικά οι τύποι των δεικτών επίδοσης παρουσιάζονται στον πίνακα 4-3, όπου q_s είναι η εκτιμημένη τιμή, q_o είναι η παρατηρημένη τιμή για την ίδια χρονική στιγμή, q_m είναι η μέση παρατηρημένη τιμή, V_s είναι ο συνολικός εκτιμημένος όγκος και V_o ο συνολικός παρατηρημένος όγκος.

ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ	ΕΞΙΣΩΣΗ
Τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (q_s - q_o)^2}$
Συντελεστής Nash – Sutcliffe	$R^2 = 1 - \frac{\sum (q_s - q_o)^2}{\sum (q_o - q_m)^2}$
Απόλυτο σφάλμα στον συνολικό όγκο	$b = \left \frac{V_s - V_o}{V_o} \right \cdot 100$
Ποσοστιαία έκφραση σφάλματος για την παροχή αιχμής	$PE = \left \frac{q_s(peak) - q_o(peak)}{q_o(peak)} \right \cdot 100$

Πίνακας 4-3 : Στατιστικοί δείκτες επίδοσης για την βαθμονόμηση του ομοιώματος.

Για τους δείκτες RMSE, b και PE, η τέλεια βαθμονόμηση (ταύτιση εκτιμημένων και παρατηρημένων τιμών) συμβαίνει όταν είναι ίσοι με μηδέν, ενώ για τον δείκτη R^2 αυτό συμβαίνει όταν είναι μονάδα. Οι δείκτες RMSE και R^2 αποτελούν μέτρο σφάλματος του συνολικού όγκου και της παροχής αιχμής μεταξύ παρατηρημένου και εκτιμημένου πλημμυρογραφήματος, ενώ ο δείκτης PE αποτελεί μέτρο σφάλματος μόνο για την παροχή αιχμής και ο δείκτης b μόνο για τον συνολικό όγκο.

4.8 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ

Το θεμελιώδες ζήτημα εάν ένα μοντέλο μπορεί να επαληθευτεί, έχει υπάρξει ένα μείζον θέμα προς συζήτηση κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας. Εντούτοις, όπως αναφέρεται από τους Hassanizadeh και Carrera (1992) καμία ομοφωνία ως προς τη μεθοδολογία (ή την ορολογία) δεν υπάρχει.

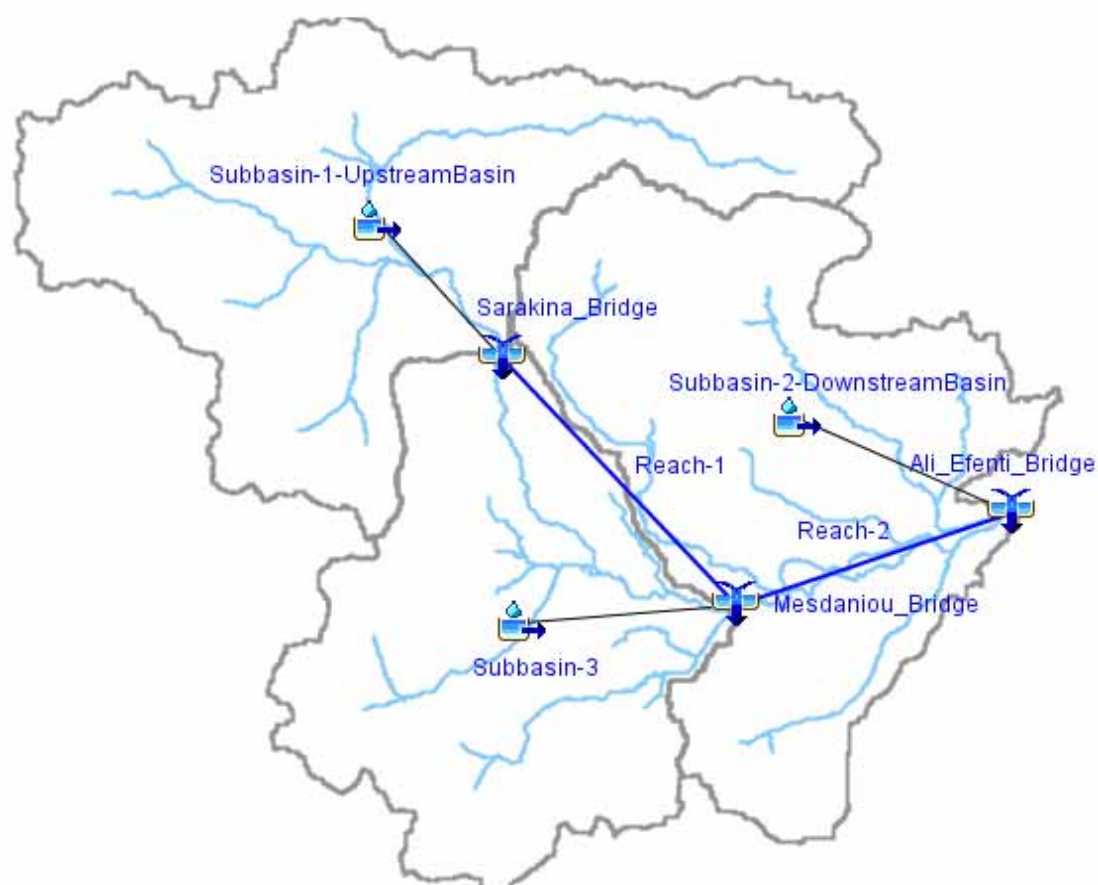
Στις περιπτώσεις όπου ένα ομοίωμα έχει βαθμονομηθεί με δεδομένα παροχών στην έξοδο της λεκάνης και στη συνέχεια υποβάλλεται σε δοκιμές επαλήθευσης με δεδομένα πεδίου όσον αφορά στις εσωτερικές μεταβλητές, τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών είναι γενικά μικρότερης ακρίβειας από τα αποτελέσματα των δοκιμών επαλήθευσης με δεδομένα παροχών, Ambroise et al (1995), Refsgaard et al (1997).

Στην παρούσα μελέτη υδρολογικής ανάλυσης της λεκάνης απορροής του Πηνειού με χρήση του ομοιώματος HEC-HMS, δεν ακολουθήθηκε η κλασική διαδικασία επαλήθευσης, σύμφωνα με την οποία ένα μέρος του δείγματος της παρατηρημένης μεταβλητής – συνήθως παροχή – χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του ομοιώματος και ένα άλλο για την επαλήθευση. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται στα ομοιώματα συνεχούς προσομοίωσης, που οι χρονοσειρές των εκτιμημένων και παρατηρημένων παροχών είναι μερικά έτη. Στην περίπτωση προσομοίωσης γεγονότος, όπως και στην παρούσα μελέτη, αυτή η διαδικασία δεν έχει νόημα. Η επαλήθευση του ομοιώματος σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να γίνει χρησιμοποιώντας διαφορετικά πλημμυρικά γεγονότα. Έτσι λοιπόν χρησιμοποιήθηκαν τα δύο από τα τρία πλημμυρογραφήματα για την βαθμονόμηση, όπως προαναφέρθηκε, και το τρίτο, του Απριλίου 1991, για την επαλήθευση του ομοιώματος. Η επαλήθευση όμως της ικανότητας προσομοίωσης πλημμυρών του ομοιώματος, έγινε μόνο ως προς τις παραμέτρους εκείνες οι οποίες βαθμονομήθηκαν με την μέθοδο δοκιμής – σφάλματος και οι τιμές τους είναι σταθερές για κάθε πλημμύρα. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους η επαλήθευση δεν έχει νόημα αφού η τιμές τους μεταβάλλονται από πλημμύρα σε πλημμύρα και προέκυψαν μετά από βαθμονόμηση, όπως και στις προηγούμενες δύο πλημμύρες. Η αξιολόγηση της επαλήθευσης έγινε με βάση τους ίδιους στατιστικούς δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του ομοιώματος.

5 : ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ HEC – HMS ΓΙΑ ΤΗΝ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε αναλυτικά το μοντέλο HEC – HMS ενώ αναφέρθηκαν και τα στάδια μοντελοποίησης που ακολουθούνται. Η παρούσα εργασία, έχει ως στόχο την προσομοίωση των διαδικασιών βροχής - απορροής σε συγκεκριμένο τμήμα της λεκάνης του ποταμού Πηνειού άρα στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα εφαρμόσουμε το μοντέλο ακριβώς στην περιοχή αυτή.



Εικόνα 5.1 : Σχηματική απεικόνιση της περιοχής μελέτης για την προσομοίωση της με το HEC - HMS

5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΠΡΩΤΟΓΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στο κεφάλαιο 4 αναφέρθηκαν τα τρία επιλεγμένα πλημμυρικά επεισόδια που θα χρησιμοποιηθούν για τις διαδικασίες βαθμονόμησης και επαλήθευσης και παρουσιάστηκαν τα υετογράμματα τους και τα πλημμυρογραφήματα που αυτά προκάλεσαν, στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’. Εισήγαμε λοιπόν αρχικά, τα δεδομένα ύψους βροχής ανά 30 λεπτά των βροχογραφικών σταθμών Μεγάλης Κερασιάς, Δρακότρυπας και Καρδίτσας, όπως επίσης και τα 30λεπτα δεδομένα παροχής για κάθε επεισόδιο ξεχωριστά. Για το ‘στήσιμο’ του μετεωρολογικού μοντέλου, θεωρήσαμε κάθε σταθμό αντιπροσωπευτικό της αντίστοιχης υπολεκάνης στην οποία εδρεύει και επειδή για τον σταθμό της Καρδίτσας δεν ήταν διαθέσιμα τα 30λεπτα δεδομένα για 2 από τα επεισόδια, εισήγαμε αντί αυτών, το συνολικό ύψος βροχής για κάθε παρατηρημένη καταιγίδα (τα ύψη δίνονται στο κεφάλαιο 4).

5.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Τα μαθηματικά πρότυπα που επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε κατά την διαδικασία προσομοίωσης παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όπως αναφέρθηκε, τα πρότυπα αυτά, εμπεριέχουν κάποιες παραμέτρους, πολλές όμως από τις οποίες θεωρούνται σταθερές για μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής. Η διαδικασία εύρεσης των τιμών τους αποτελείται από ένα πρώτο βήμα της αρχικής εκτίμησης με την βοήθεια του θεωρητικού υποβάθρου και ολοκληρώνεται με την εμπειρική τεχνική βαθμονόμησης ‘δοκιμής – σφάλματος’. Οι τελικές τιμές αφορούν την συγκεκριμένη και μόνο περιοχή και θεωρούνται σταθερές για οποιοδήποτε πλημμυρικό επεισόδιο το οποίο λαμβάνει χώρα εκεί. Έτσι λοιπόν και για τα τρία επεισόδια που έχουμε επιλέξει, οι παράμετροι C_p και C_t του μοναδιαίου υδρογραφήματος Snyder, K και χ του προτύπου διόδευσης Muskingum και αριθμός καμπύλης CN του προτύπου απωλειών κατά SCS θα διατηρήσουν την ίδια βελτιστοποιημένη τιμή που θα έχουμε υπολογίσει (με τη μέθοδο δοκιμής – σφάλματος). Τα δύο επεισόδια Δεκεμβρίου 1989 και Μαΐου 1991 χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστούν οι βέλτιστες αυτές τιμές, ενώ το τρίτο επεισόδιο Απριλίου 1991 χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση.

Αντιθέτως, η αναλογία ως προς την παροχή αιχμής R και η σταθερά εκθετικής μείωσης k στο πρότυπο βασικής απορροής και οι αρχικές απώλειες I_a στο πρότυπο απωλειών SCS είναι παράμετροι των οποίων οι τιμές δεν μπορούν να θεωρηθούν σταθερές καθώς εξαρτώνται άμεσα από το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα και την υπάρχουσα υγρασιακή κατάσταση του εδάφους. Για τις παραμέτρους αυτές υπολογίζουμε την αρχική τους τιμή με βάση τους τύπους που διέπουν το μαθηματικό τους πρότυπο και με την βοήθεια της αυτόματης βαθμονόμησης την οποία παρέχει το πρόγραμμα, βρίσκουμε τις βελτιστοποιημένες τιμές τους. Τονίζεται και πάλι ότι οι τιμές αυτές θα είναι διαφορετικές για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο.

Θα παρουσιάσουμε λοιπόν, τις αρχικές και βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων, ξεκινώντας από τα πρότυπα που ρυθμίστηκαν δοκιμαστικά και οι τιμές των παραμέτρων τους είναι ίδιες για όλες τις προσομοιώσεις και θα συνεχίσουμε με τα πρότυπα που ρυθμίστηκαν με την αυτοματοποιημένη διαδικασία και οι τιμές των παραμέτρων τους είναι διαφορετικές για κάθε προσομοίωση.

5.3.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΥΔΡΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ SNYDER

Οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο μοναδιαίο υδρογράφημα κατά Snyder είναι ο χρόνος υστέρησης κάθε υπολεκάνης t_p (Snyder time to peak) και η σταθερά C_p (peaking coefficient). Σύμφωνα με τις εξισώσεις 4.9 (κεφάλαιο 4), ο χρόνος υστέρησης εξαρτάται άμεσα από τη σταθερά C_t και τα φυσικά χαρακτηριστικά κάθε υπολεκάνης, δηλαδή, την μέση της κλίση S_{mean} , την έκτασή της A , το μέγιστο μήκος υδατορεύματος L_m και το μέγιστο μήκος υδατορεύματος από την έξοδο μέχρι το κέντρο βάρους της L_c . Στον πίνακα 5-1 φαίνονται οι τιμές των φυσικών χαρακτηριστικών κάθε υπολεκάνης ενώ στον πίνακα 5-2 οι τιμές των σταθερών C_p και C_t και του χρόνου υστερησης t_p για κάθε υπολεκάνη. Όσον αφορά στις αρχικές τιμές των σταθερών C_p και C_t αυτές επιλέχθηκαν με βάση την μέση κλίση των υπολεκανών και τους εξ ορισμού περιορισμούς στα άνω και κάτω άκρα τους. Για υπολεκάνες με μεγάλες κλίσεις η τιμή του C_t τείνει στη χαμηλότερη τιμή ενώ έχει παρατηρηθεί ότι σε μικρές τιμές του C_t αντιστοιχούν μεγάλες τιμές του C_p και αντιστρόφως (Bedient and Huber, 1992).

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	Lm	Lc	A	Smean
	km	km	km ²	%
1	25.2	8.1	1058.73	12.99
2	26.5	17.0	1021.33	5.69
3	30.5	12.2	801.9	11.18

Πίνακας 5-1 Τιμές φυσικών χαρακτηριστικών υπολεκανών περιοχής μελέτης

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	Ct (1.8 – 2.2)		Tp (hrs)		Cp (0.4 – 0.8)	
	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη
1	2.00	2.16	7.39	8.00	0.55	0.45
2	2.15	2.15	10.08	10.10	0.40	0.40
3	2.05	2.20	9.07	10.30	0.45	0.40

Πίνακας 5-2 Αρχικές και βελτιστοποιημένες τιμές παραμέτρων προτύπου άμεσης απορροής

5.3.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ

Για τον προσδιορισμό της αρχικής τιμής του αριθμού καμπύλης (curve number), όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι απαραίτητη η γνώση των χρήσεων γης και της γεωλογίας των υπολεκανών της περιοχής μελέτης. Με την βοήθεια του Σ.Γ.Π Arcview, προσδιορίσαμε τα πολύγωνα χρήσεων γης, την κατηγορία του εδάφους και την υδρολογική του κατάσταση και μπορέσαμε έτσι να υπολογίσουμε τον μέσο αριθμό καμπύλης για κάθε υπολεκάνη ξεχωριστά. Με την μέθοδο ‘δοκιμής – σφάλματος’ καταλήξαμε στις βελτιστοποιημένες τιμές που παρουσιάζουμε στον πίνακα 5-3 και οι οποίες διατηρήθηκαν σταθερές στην υπόλοιπη διαδικασία προσομοίωσης για όλα τα πλημμυρικά επεισόδια.

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ CN	
	Αρχική	Βέλτιστη
1	66	66
2	76	75
3	73	72

Πίνακας 5-3 Αρχικές και βελτιστοποιημένες τιμές αριθμού καμπύλης CN

5.3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΔΙΟΔΕΥΣΗΣ MUSKINGUM

Στο κεφάλαιο 4 αναλύσαμε την φυσική σημασία των παραμέτρων K και χ του προτύπου Muskingum. Εδώ θα παραθέσουμε τις αρχικές και βελτιστοποιημένες τιμές τους. Η σταθερά χρονικής υστέρησης K, αυξάνεται με τη μείωση του μήκους του υδατορεύματος και με την αύξηση της κλίσης του. Ο υπολογισμός της αρχικής τιμής της μέσω των εξισώσεων του προτύπου Muskingum δεν είναι δυνατός καθώς δεν έχουμε κάποια από τα απαραίτητα δεδομένα στη διάθεσή μας. Γι αυτό λοιπόν, οι τιμές των K και χ προέκυψαν κυρίως με την μέθοδο 'δοκιμής – σφάλματος'. Σημαντικός περιορισμός είναι η ανάγκη για ευστάθεια της μεθόδου που απαιτεί τα K, χ και Δt (εδώ $\Delta t=0,5hr$) να ικανοποιούν τους περιορισμούς που τέθηκαν στο κεφάλαιο 4. Αρχικά λοιπόν, επιλέξαμε μια τιμή για το K και έπειτα με βάση τη σχέση $\Delta t / K = 2\chi$ υπολογίσαμε και την τιμή του χ . Στον πίνακα 5-4 παρουσιάζονται το μήκος και η κλίση των δύο υδατορευμάτων και οι αρχικές και οι βελτιστοποιημένες τιμές των K και χ .

ΥΔΑΤΟΡΕΥΜΑ	ΜΗΚΟΣ	ΚΛΙΣΗ	K (hrs)		χ	
	km	m/m	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη
υδατόρευμα 1	30.5	0.0032	3.0	6.0	0.08	0.15
υδατόρευμα 2	26.5	0.0006	5.0	8.0	0.05	0.22

Πίνακας 5-4 Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρων προτύπου Muskingum.

5.3.4 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αλλά και στο παρόν, υπάρχουν ορισμένες παράμετροι, οι τιμές των οποίων κρίθηκε σκόπιμο να προσδιοριστούν για κάθε πλημμύρα ξεχωριστά γιατί είναι φυσικό να μεταβάλλονται από μήνα σε μήνα. Οι παράμετροι αυτές είναι οι αρχικές απώλειες I_a στο πρότυπο υπολογισμού των απωλειών βροχόπτωσης και η αναλογία ως προς την παροχή αιχμής R και η σταθερά μείωσης k στο πρότυπο υπολογισμού της βασικής απορροής. Για τις αρχικές τιμές των παραμέτρων αυτών ακολουθούμε τους μαθηματικούς τύπους των προτύπων, ενώ για τις βελτιστοποιημένες τιμές χρησιμοποιήθηκε η αυτόματη βαθμονόμηση του προγράμματος HEC – HMS. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι αρχικές και οι βέλτιστες τιμές για κάθε επεισόδιο.

5.3.4.1 ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 1989

Για την εκτίμηση της αρχικής τιμής της παραμέτρου των αρχικών απωλειών I_a , όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 4, προτείνεται η χρήση της σχέσης $I_a = 0.2S$, όπου το S είναι οι μέγιστες πιθανές απώλειες και μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 4.6. Η σχέση αυτή όμως ($I_a = 0.2S$) δεν λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν πριν και κατά την έναρξη κάθε πλημμυρικού επεισοδίου. Για παράδειγμα η βλάστηση αλλά και η υγρασία του εδάφους είναι διαφορετική τον Ιανουάριο από τον Ιούνιο άρα και η βέλτιστη τιμή της παραμέτρου I_a αναμένουμε να απέχει από το 20% της μέγιστης αποθηκευτικότητας. Στον πίνακα 5-5 παρουσιάζονται οι αρχικές και βέλτιστες τιμές των S , I_a / S και I_a .

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	S (mm)		I _a / S		I _a (mm)	
	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη
1	130.85	130.85	0.2	0.11	26.17	14.77
2	80.20	84.67	0.2	0.17	16.04	14.45
3	93.95	98.77	0.2	0.12	18.79	11.63

Πίνακας 5-5 Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρου I_a για το πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989 (αιχμή 10/12/1989).

Όσον αφορά στις άλλες δύο παραμέτρους του προτύπου εκθετικής μείωσης της βασικής απορροής, θα ακολουθήσουμε πιστά όσα περιγράψαμε στο κεφάλαιο 4. Οι παράμετροι αυτές εξαρτώνται άμεσα από το πλημμυρογράφημα. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι θα έχουν διαφορετικές τιμές για κάθε επεισόδιο. Επίσης από τη στιγμή που διαθέσιμο παρατηρημένο πλημμυρογράφημα έχουμε μόνο στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’, οι αρχικές τιμές τους θα είναι ίδιες για όλες τις υπολεκάνες.

Για την παράμετρο ‘αναλογία ως προς την παροχή αιχμής’, προβαίνουμε σε λογαρίθμηση του καθοδικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος και εντοπίζουμε το σημείο καμπής της γραφικής παράστασης. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε μία τιμή παροχής και η αναλογία της ως προς την αιχμή είναι και η ζητούμενη. Για την σταθερά εκθετικής μείωσης, παρατηρούμε τα δεδομένα παροχών της τελευταίας ημέρας πριν την έναρξη της άμεσης απορροής και υπολογίζουμε τον λόγο των παροχών αυτών (με διαφορά μιας ημέρας) όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στον πίνακα 5-6 παρουσιάζονται οι αρχικές και οι βέλτιστες τιμές των δυο παραμέτρων.

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	Σταθερά εκθετικής μείωσης k		Αναλογία ως προς την παροχή αιχμής, R	
	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη
1	0.94	0.82	0.58	0.58
2	0.94	0.92	0.58	0.57
3	0.94	0.90	0.58	0.62

Πίνακας 5-6 Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρων k και R για το πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989 (αιχμή 10/12/1989).

5.3.4.2 ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΜΑΪΟΥ 1991

Ακολουθούμε και για αυτό το επεισόδιο ακριβώς την ίδια μεθοδολογία με το πρώτο. Στον πίνακα 5-7 παρουσιάζονται οι αρχικές και βέλτιστες τιμές των S, Ia / S και Ia και στον πίνακα 5-8 οι αρχικές και οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων k και R.

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	S (mm)		Ia / S		Ia(mm)	
	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη
1	130.85	130.85	0.2	0.21	26.17	27.12
2	80.20	84.67	0.2	0.25	16.04	21.41
3	93.95	98.77	0.2	0.26	18.79	26.49

Πίνακας 5-7 Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρου Ia για το πλημμυρικό επεισόδιο Μαΐου 1991 (αιχμή 11/5/1991).

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	Σταθερά εκθετικής μείωσης k		Αναλογία ως προς την παροχή αιχμής, R	
	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη
1	0.95	0.97	0.48	0.48
2	0.95	0.98	0.48	0.48
3	0.95	0.98	0.48	0.24

Πίνακας 5-8 Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρων k και R για το πλημμυρικό επεισόδιο Μαΐου 1991 (αιχμή 11/5/1991).

5.3.4.3 ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΑΠΡΙΛΙΟΥ 1991

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα επεισόδια Δεκεμβρίου 1989 και Μαΐου 1991 χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του μοντέλου, ενώ το παρόν για την επαλήθευση. Ακολουθούμε και για αυτό το επεισόδιο ακριβώς την ίδια μεθοδολογία με τα άλλα δύο. Στον πίνακα 5-9 παρουσιάζονται οι αρχικές και βέλτιστες τιμές των S, Ia / S και Ia και στον πίνακα 5-10 οι αρχικές και οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων k και R.

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	S (mm)		Ia / S		Ia(mm)	
	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη
1	130.85	130.85	0.2	0.23	26.17	29.69
2	80.20	84.67	0.2	0.21	16.04	18.03
3	93.95	98.77	0.2	0.20	18.79	19.82

Πίνακας 5-9 Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρου Ia για το πλημμυρικό επεισόδιο Απριλίου 1991 (αιχμή 8/4/1991).

ΥΠΟΛΕΚΑΝΕΣ	Σταθερά εκθετικής μείωσης k		Αναλογία ως προς την παροχή αιχμής, R	
	Αρχική	Βέλτιστη	Αρχική	Βέλτιστη
1	0.94	0.71	0.34	0.97
2	0.94	0.90	0.34	0.85
3	0.94	0.79	0.34	0.87

Πίνακας 5-10 Αρχικές και βέλτιστες τιμές παραμέτρων k και R για το πλημμυρικό επεισόδιο Απριλίου 1991 (αιχμή 8/4/1991).

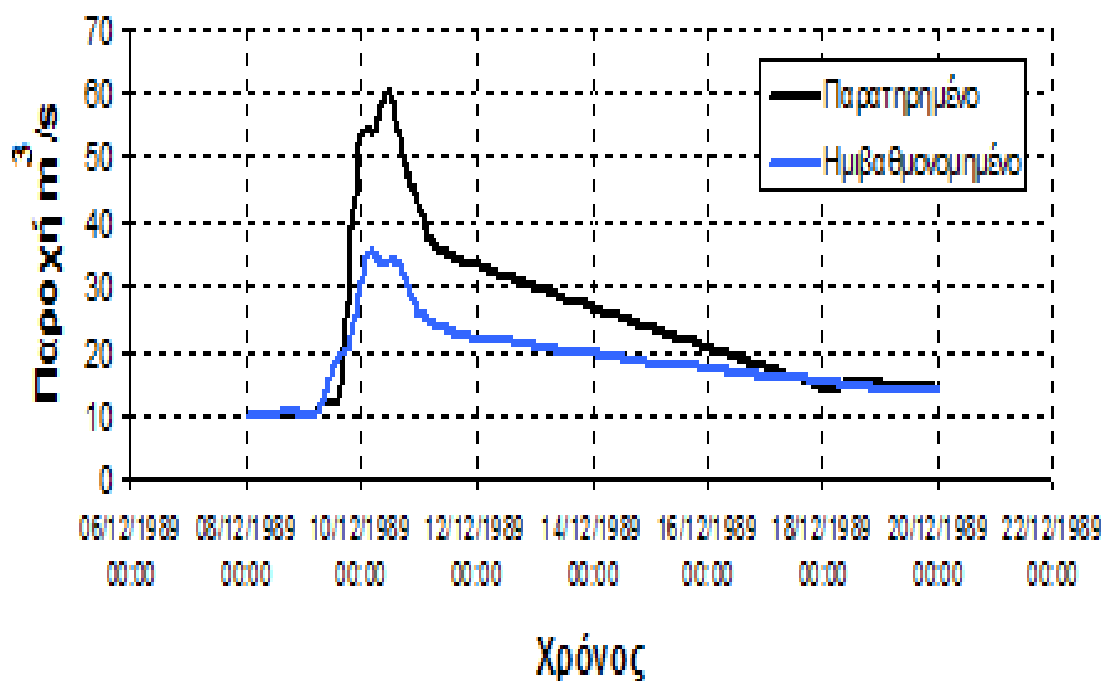
6 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

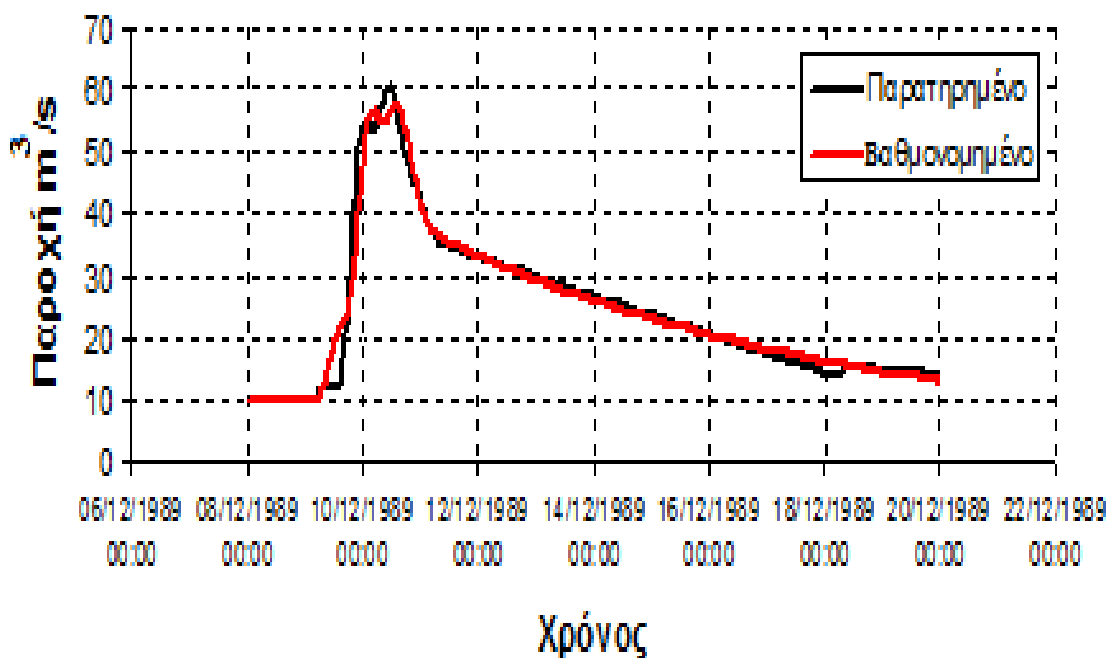
Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε για κάθε ένα από τα πλημμυρικά επεισόδια, τα πλημμυρογραφήματα τα οποία προέκυψαν κατά την διαδικασία της προσομοίωσης. Σε κάθε επεισόδιο παραθέτουμε τρία πλημμυρογραφήματα, το παρατηρημένο, το ημιβαθμονομημένο και το πλήρως βαθμονομημένο. Το παρατηρημένο πλημμυρογράφημα χρησιμοποιείται ουσιαστικά για να γίνεται η οπτική σύγκριση με τα αντίστοιχα πλημμυρογραφήματα μετά την βαθμονόμηση. Το ημιβαθμονομημένο, προκύπτει με χρήση των τιμών των παραμέτρων τις οποίες θεωρήσαμε σταθερές για κάθε επεισόδιο, μετά την βαθμονόμησή τους με την μέθοδο ‘δοκιμής – σφάλματος’. Ταυτόχρονα, διατηρούμε σταθερές τις αρχικές τιμές των υπολοίπων παραμέτρων, τις οποίες θεωρούμε ότι μεταβάλλονται σε κάθε επεισόδιο. Το πλήρως βαθμονομημένο πλημμυρογράφημα προκύπτει με χρήση των τελικών, βέλτιστων τιμών όλων των παραμέτρων (οι τιμές των παραμέτρων παρατίθενται στο κεφάλαιο 5).

6.1.1 ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 1989

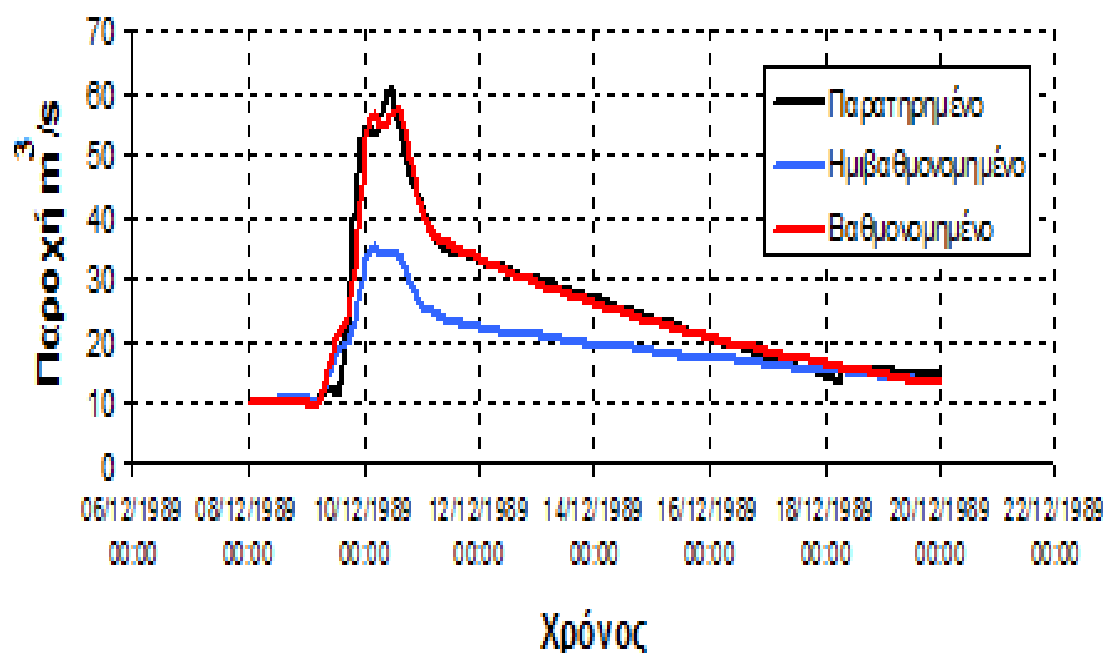
Παρουσιάζονται εδώ, τα πλημμυρογραφήματα στη θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο βροχόπτωσης 7 – 10 Δεκεμβρίου 1989, το οποίο υπενθυμίζουμε ότι χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία της βαθμονόμησης. Στο διάγραμμα 6-1 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ παρατηρημένου και ημιβαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος, στο 6-2 η σύγκριση μεταξύ παρατηρημένου και πλήρως βαθμονομημένου και στο 6-3 μεταξύ παρατηρημένου, ημιβαθμονομημένου και πλήρως βαθμονομημένου:



Διάγραμμα 6-1 : Σύγκριση παρατηρημένου και ημιβαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.



Διάγραμμα 6-2 : Σύγκριση παρατηρημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.



Διάγραμμα 6-3 : Σύγκριση παρατηρημένου, ημιβαθμονομημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989.

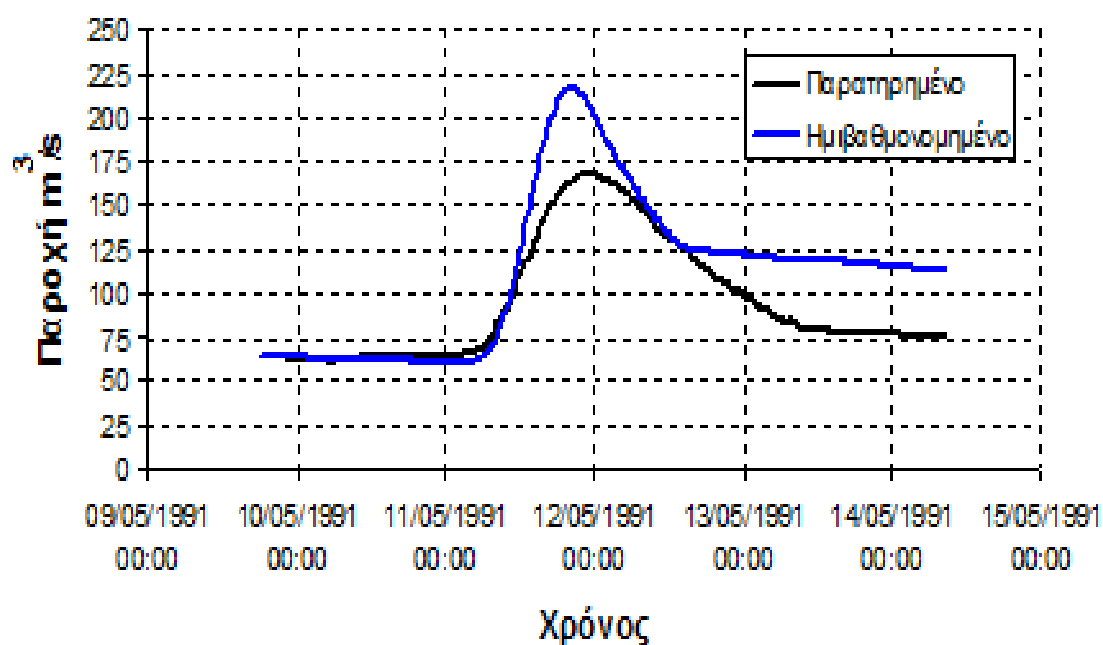
Στον παρακάτω πίνακα παραθέτουμε κάποια σημαντικά στοιχεία για τα παρουσιασθέντα πλημμυρογραφήματα, όπως η παροχή αιχμής, η ώρα όπου αυτή παρουσιάζεται και ο συνολικός όγκος της απορροής (σε m^3/sec και σε mm):

	Παρατηρημένο	Ημιβαθμονομημένο	Βαθμονομημένο
Αιχμή (m^3/sec)	60.34	35.40	57.60
Ωρα αιχμής	10Δεκ89 , 10:30	10Δεκ89 , 04:00	10Δεκ89 , 14:00
Συνολική απορροή (m^3)	25129000	19278000	25178000
Συνολική απορροή (mm)	8.72	6.69	8.74

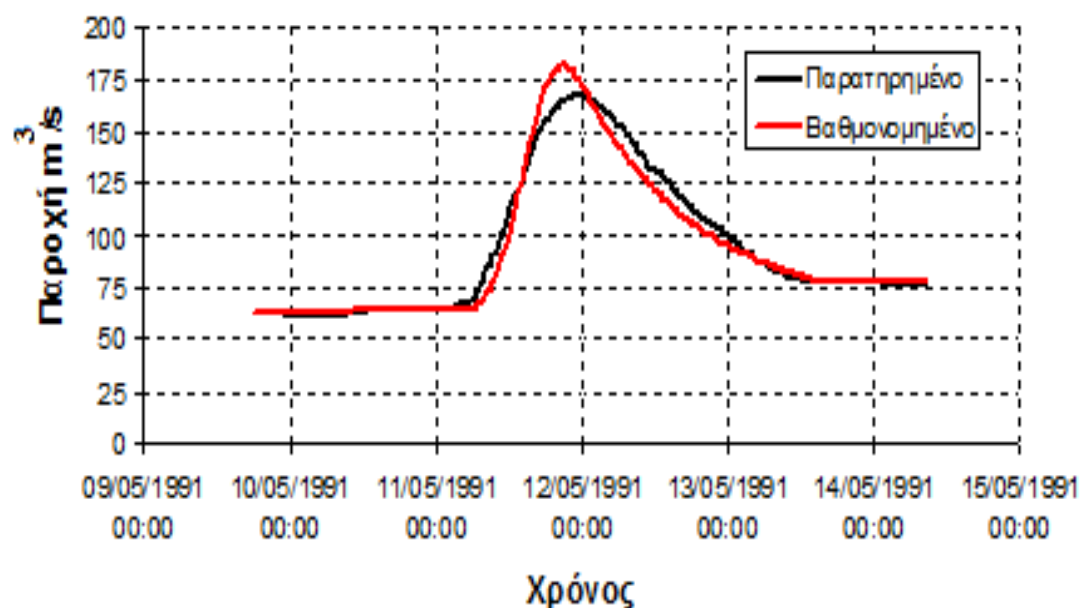
Πίνακας 6-1 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων του επεισοδίου Δεκεμβρίου 1989.

6.1.2 ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΜΑΪΟΥ 1991

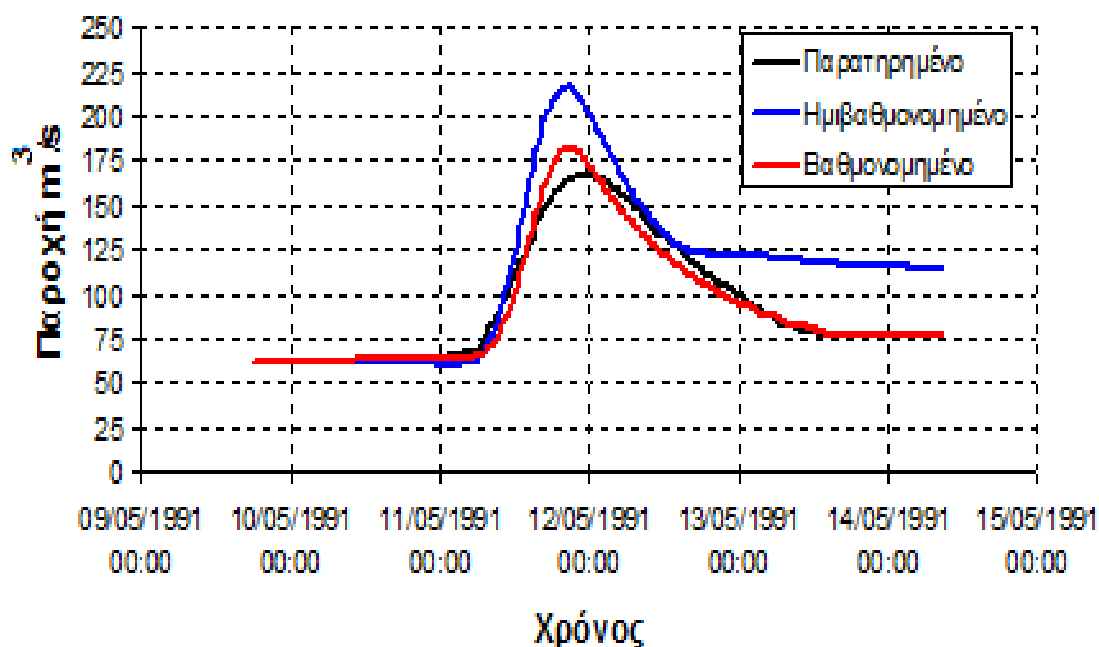
Ομοίως με το επεισόδιο Δεκεμβρίου, παρουσιάζονται τα πλημμυρογραφήματα στη θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο βροχόπτωσης 9 – 11 Μαΐου 1991, το οποίο επίσης χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία της βαθμονόμησης. Στο διάγραμμα 6-4 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ παρατηρημένου και ημιβαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος, στο 6-5 η σύγκριση μεταξύ παρατηρημένου και πλήρως βαθμονομημένου και στο 6-6 μεταξύ παρατηρημένου, ημιβαθμονομημένου και πλήρως βαθμονομημένου:



Διάγραμμα 6-4 : Σύγκριση παρατηρημένου και ημιβαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Μαΐου 1991.



Διάγραμμα 6-5 : Σύγκριση παρατηρημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Μαΐου 1991.



Διάγραμμα 6-6 : Σύγκριση παρατηρημένου, ημιβαθμονομημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Μαΐου 1991.

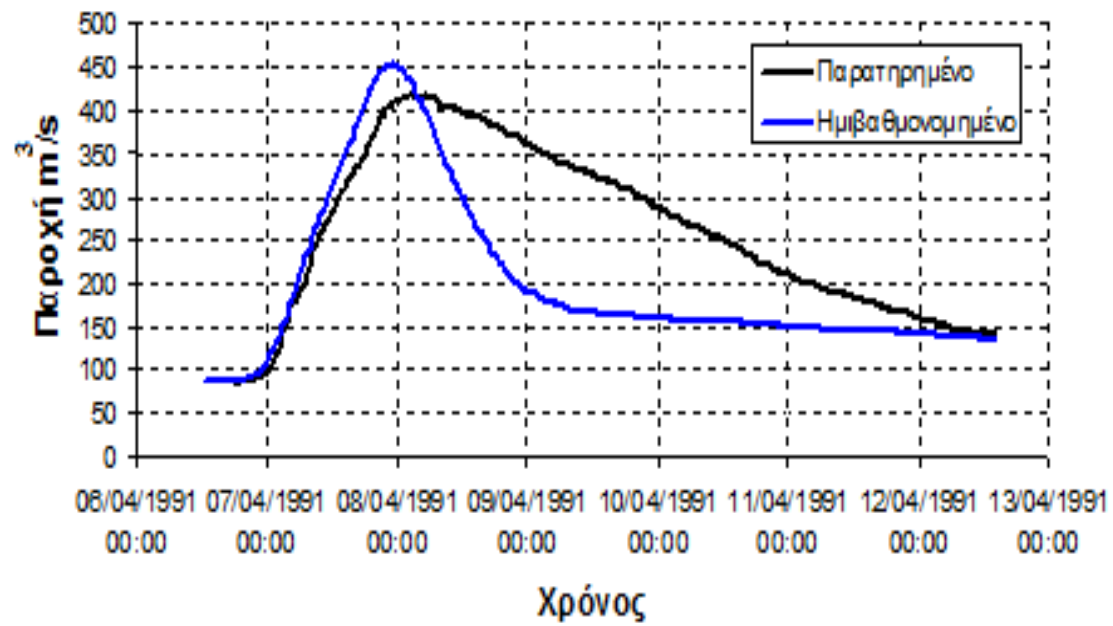
Στον πίνακα 6-2 παραθέτουμε κάποια σημαντικά στοιχεία για τα παρουσιασθέντα πλημμυρογραφήματα του επεισοδίου Μαΐου 1991, όπως η παροχή αιχμής, η ώρα όπου αυτή παρουσιάζεται και ο συνολικός όγκος της απορροής (σε m^3/sec και σε mm):

	Παρατηρημένο	Ημιβαθμονομημένο	Βαθμονομημένο
Αιχμή (m^3/sec)	167.35	216.70	181.90
Ώρα αιχμής	11Μαι91 , 23:30	11Μαι91 , 20:30	11Μαι91 , 21:00
Συνολική απορροή (m^3)	37486000	44324000	37022000
Συνολική απορροή (mm)	13.01	15.38	12.85

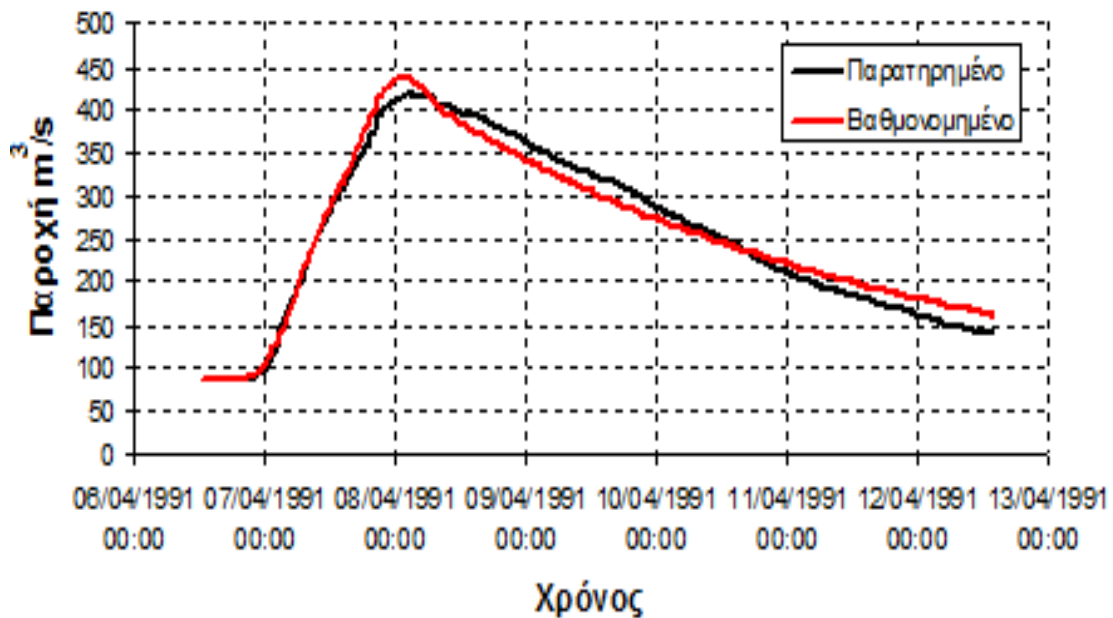
Πίνακας 6-2 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων για το επεισόδιο Μαΐου 1991.

6.1.3 ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ ΑΠΡΙΛΙΟΥ 1991

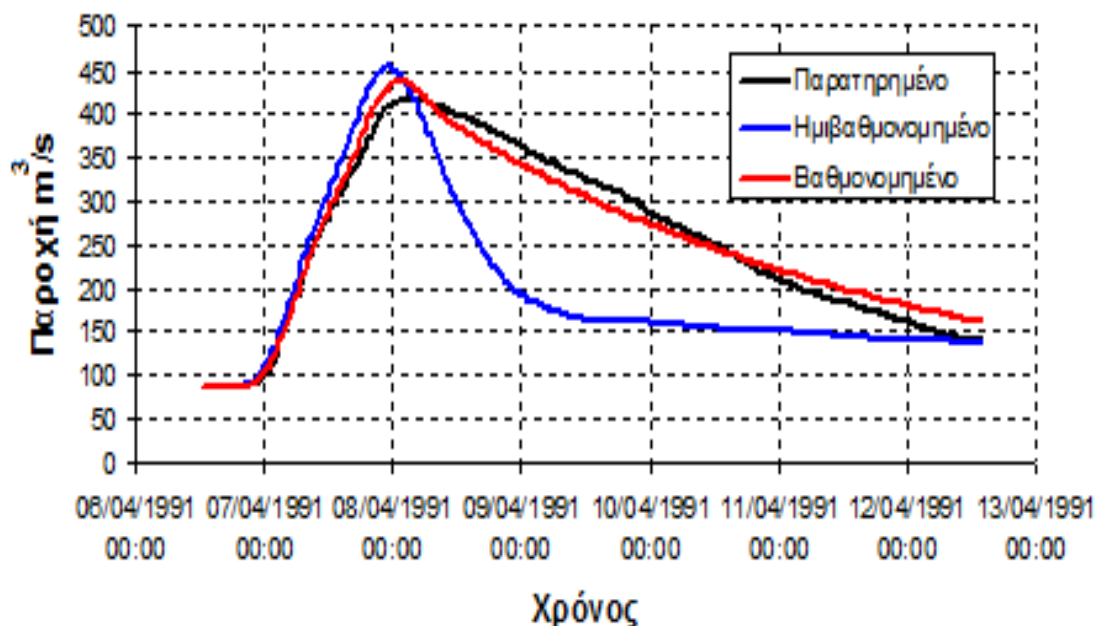
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το επεισόδιο βροχόπτωσης 6 – 7 Απριλίου 1991 χρησιμοποιήθηκε για την επαλήθευση του ομοιώματος. Παρουσιάζουμε λοιπόν εδώ τα πλημμυρογραφήματα στη θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’. Στο διάγραμμα 6-7 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ παρατηρημένου και ημιβαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος, στο 6-8 η σύγκριση μεταξύ παρατηρημένου και πλήρως βαθμονομημένου και στο 6-9 μεταξύ παρατηρημένου, ημιβαθμονομημένου και πλήρως βαθμονομημένου. Για το συγκεκριμένο επεισόδιο βέβαια, βαθμονόμηση έγινε μόνο στις παραμέτρους που είναι διαφορετικές για κάθε επεισόδιο. Έτσι λοιπόν οι όροι ‘ημιβαθμονομημένο’ και ‘πλήρως βαθμονομημένο’, εδώ χρησιμοποιούνται για λόγους πρακτικούς και απλούστευσης.



Διάγραμμα 6-7 : Σύγκριση παρατηρημένου και ημιβαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση 'γέφυρα Αλή Εφέντη' για το επεισόδιο Απριλίου 1991.



Διάγραμμα 6-8 : Σύγκριση παρατηρημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση 'γέφυρα Αλή Εφέντη' για το επεισόδιο Απριλίου 1991.



Διάγραμμα 6-9 : Σύγκριση παρατηρημένου, ημιβαθμονομημένου και βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για το επεισόδιο Απριλίου 1991.

Στον πίνακα 6-3 παραθέτονται κάποια σημαντικά στοιχεία για τα παρουσιασθέντα πλημμυρογραφήματα του επεισοδίου Απριλίου 1991, όπως η παροχή αιχμής, η ώρα όπου αυτή παρουσιάζεται και ο συνολικός όγκος της απορροής (σε m^3/sec και σε mm):

	Παρατηρημένο	Ημιβαθμονομημένο	Βαθμονομημένο
Αιχμή (m^3/sec)	418.18	453.60	436.30
Ωρα αιχμής	8Απρ91 , 02:30	7Απρ91 , 23:00	8Απρ91 , 01:30
Συνολική απορροή (m^3)	134074000	104219000	134669000
Συνολική απορροή (mm)	46.52	36.16	46.73

Πίνακας 6-3 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων για το επεισόδιο Απριλίου 1991.

6.1.4 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΠΙΔΟΣΗΣ

Στο κεφάλαιο 4 αναφερθήκαμε στους τέσσερις στατιστικούς δείκτες επίδοσης τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε στην παρούσα εργασία. Στον πίνακα 6-4 φαίνονται οι τιμές καθενός από αυτούς ξεχωριστά, για κάθε επεισόδιο, σε κάθε στάδιο της βαθμονόμησης. Στα επερχόμενα υποκεφάλαια θα παραθέσουμε και τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από τις μεταβολές των δεικτών αυτών.

Στατιστικοί Δείκτες Επίδοσης :		RMSE	PE	b	R ²
Πλημμυρικά Επεισόδια					
Πλημμυρικό επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989	Ημιβαθμονομημένο	8.711	41.332	23.269	0.483
	Βαθμονομημένο	1.913	4.541	0.212	0.975
Πλημμυρικό επεισόδιο Μαΐου 1991	Ημιβαθμονομημένο	25.544	29.489	18.241	0.446
	Βαθμονομημένο	6.128	8.694	1.237	0.968
Πλημμυρικό επεισόδιο Απριλίου 1991	Ημιβαθμονομημένο	89.244	8.465	22.268	0.207
	Βαθμονομημένο	15.265	4.448	0.444	0.978

Πίνακας 6-4 : Στατιστικοί δείκτες επίδοσης της βαθμονόμησης για κάθε επεισόδιο.

6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Στα κεφάλαια 5 και 6 (έως εδώ) έχουμε παρουσιάσει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της λεκάνης απορροής του ποταμού Πηνειού. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούσαν στις βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων που περιλαμβάνονται στα επιλεγμένα μαθηματικά πρότυπα, στα διαγράμματα – πλημμυρογραφήματα στην θέση ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’ για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο ξεχωριστά και στους στατιστικούς δείκτες επίδοσης της βαθμονόμησης. Μετά την παρατήρηση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών καταλήξαμε σε κάποια ενδιαφέροντα συμπεράσματα τα οποία και παραθέτουμε στα κάτωθι υποκεφάλαια.

6.2.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, οι παράμετροι που υπεισέρχονται στο μοντέλο HEC – HMS μέσω των μαθηματικών προτύπων, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία βρίσκονται οι παράμετροι οι οποίες για την συγκεκριμένη λεκάνη απορροής και για οποιοδήποτε επεισόδιο βροχόπτωσης παραμένουν σταθερές. Οι παράμετροι αυτές είναι: οι συντελεστές C_p και C_t του μοναδιαίου υδρογραφήματος Snyder, τα K και χ του προτύπου διόδευσης Muskingum και ο αριθμός καμπύλης CN του προτύπου απωλειών κατά SCS. Η διαδικασία εύρεσης των βελτιστοποιημένων τιμών τους στηρίχτηκε στην μέθοδο βαθμονόμησης ‘δοκιμής – σφάλματος’ με χρήση των επεισοδίων Δεκεμβρίου 1989 και Μαΐου 1991. Η δεύτερη κατηγορία απαρτίζεται από τις παραμέτρους οι τιμές των οποίων μεταβάλλονται για κάθε παρατηρημένο πλημμυρογράφημα. Οι παράμετροι αυτές είναι οι αρχικές απώλειες I_a του προτύπου απωλειών κατά SCS, η αναλογία ως προς την παροχή αιχμής R και η σταθερά εκθετικής μείωσης k του προτύπου εκθετικής μείωσης της βασικής απορροής. Οι βελτιστοποιημένες τους τιμές προέκυψαν με την αυτόματη βαθμονόμηση που παρέχει ως ‘εργαλείο’ το μοντέλο HEC – HMS.

Ξεκινώντας από τις σταθερές παραμέτρους, παρατηρούμε τις τιμές των C_p και C_t του μοναδιαίου υδρογραφήματος Snyder, συντελεστές, οι οποίοι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης. Σύμφωνα με τους Bedient and Huber, (1992), οι τιμές του C_p πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ του 0.40 και του 0.80 ενώ οι τιμές του C_t μεταξύ του 1.80 και του 2.20. Οι βελτιστοποιημένες τιμές του μοντέλου μας καλύπτουν τις απαιτήσεις αυτές ($C_p = 0.45$, 0.40 , 0.40 και $C_t = 2.16$, 2.15, 2.20). Επίσης μέσα από έρευνες έχει διαπιστωθεί ότι σε υψηλές τιμές της μιας παραμέτρου αντιστοιχούν χαμηλές τιμές της άλλης και αντίστροφα κάτι το οποίο ισχύει και στην περίπτωση μας. Τέλος έχει παρατηρηθεί ότι σε λεκάνες με μεγάλες κλίσεις η τιμή του C_t τείνει στη χαμηλότερη τιμή. Στην παρούσα μελέτη, κάτι τέτοιο είναι δύσκολο να διαπιστωθεί καθώς οι τελικές τιμές της εν λόγω παραμέτρου είναι πολύ κοντά και για τις τρεις υπολεκάνες.

Όσον αφορά στις παραμέτρους K και χ του προτύπου Muskingum, οφείλουμε να σημειώσουμε ότι η απόφαση για την αρχική αλλά και την τελική, βελτιστοποιημένη τους τιμή ήταν ιδιαίτερα δύσκολη. Το K εκφράζει το χρόνο που χρειάζεται το πλημμυρικό κύμα για να διανύσει το τμήμα του ποταμού που αντιστοιχεί στην κάθε υπολεκάνη και ισούται περίπου με την χρονική απόσταση των αιχμών των πλημμυρογραφημάτων εισόδου και εξόδου. Από την στιγμή που δεν είχαμε στη διάθεσή μας τις παρατηρημένες παροχές σε άλλη θέση εκτός της γέφυρας Αλή Εφέντη, έπρεπε να στραφούμε σε ένα μαθηματικό υπολογισμό του K (αναφορικά με την εύρεση της αρχικής του τιμής). Ένας τέτοιος υπολογισμός όμως, προϋπέθετε την γνώση του μήκους του υδατορεύματος, το οποίο γνωρίζαμε αλλά και της ταχύτητας του πλημμυρικού κύματος για την οποία όμως δεν είχαμε στη διάθεσή μας στοιχεία. Καταφύγαμε έτσι στην χρήση μιας μέσης τιμής ταχύτητας πλημμυρικού κύματος που έχει υπολογιστεί από διάφορες μελέτες. Όσον αφορά στην βελτιστοποίηση της τιμής της παραμέτρου, όπως παρατηρούμε και παρακάτω στην ανάλυση ευαισθησίας, αλλαγές αυτής προκαλούν ελάχιστες διαφοροποιήσεις στο τελικό πλημμυρογράφημα κάτι που δυσκολεύει την τελική επιλογή. Οι τιμές τις οποίες αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε εν τέλει ήταν αυτές που προσομοίωναν όσο το δυνατόν καλύτερα τα βαθμονομημένα με τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα.

Για τις βελτιστοποιημένες τιμές του αριθμού καμπύλης CN , δεν θα κάνουμε κάποιον ιδιαίτερο σχολιασμό καθώς το γεγονός ότι η μεταβολή ήταν μόνο μια

μονάδα και μόνο για τις δύο από τις τρεις υπολεκάνες, αποδεικνύει την αξιοπιστία της μεθόδου και την δυνατότητα να παράγει ακριβή αποτελέσματα.

Η δεύτερη παράμετρος που εμπεριέχεται στο πρότυπο απωλειών κατά SCS είναι οι αρχικές απώλειες Ια και όπως έχει προαναφερθεί αρκετές φορές, μεταβάλλεται για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται στους πίνακες 5-5, 5-7, 5-9, οι βελτιστοποιημένες τιμές της καθώς επίσης και ο λόγος αυτής προς την μέγιστη αποθηκευτικότητα της υπολεκάνης. Ουσιαστικά οι αρχικές απώλειες επηρεάζουν τον συνολικό όγκο της απορροής και την μορφή του ανοδικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος. Παρατηρούμε ότι ενώ στο επεισόδιο Δεκεμβρίου 1989, οι αρχικές απώλειες έχουν υπερεκτιμηθεί και συνεπώς με την βαθμονόμηση οι βελτιστοποιημένες τους τιμές παρουσιάζονται μειωμένες, στα άλλα δύο επεισόδια, Απριλίου και Μαΐου 1991, έχουν υποεκτιμηθεί άρα οι βελτιστοποιημένες τους τιμές παρουσιάζονται αυξημένες συγκριτικά με τις αρχικές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην διαφορετικότητα της υπάρχουσας υγρασίας του εδάφους πριν από κάθε επεισόδιο. Οι αρχικές απώλειες, θεωρητικά, υπολογίζονται ως το 20% της μέγιστης αποθηκευτικότητας της λεκάνης, στον υπολογισμό της οποίας υπεισέρχεται και ο αριθμός καμπύλης CN. Ο αριθμός καμπύλης όμως, όσον αφορά στην υπάρχουσα υγρασιακή κατάσταση του εδάφους, δέχεται κάποιους μέσους όρους υγρασιακών καταστάσεων και από την στιγμή που αποφασίσαμε να τον θεωρήσουμε ως μια σταθερή παράμετρο για κάθε επεισόδιο θα πρέπει να περιμένουμε μεταβολές στις τιμές των αρχικών απωλειών. Μία δεύτερη εξήγηση της διαφοράς στην τιμή των αρχικών τιμών της παραμέτρου από τις βελτιστοποιημένες είναι ότι ενώ θεωρητικά οι αρχικές απώλειες ισούνται με το 20% της μέγιστης αποθηκευτικότητας, πρακτικά και ουσιαστικά αυτό δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στην πραγματικότητα και αποτελεί απλώς μια πρώτη αρχική εκτίμηση.

Οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων που συνθέτουν το πρότυπο εκθετικής μείωσης της βασικής απορροής είναι ουσιαστικά υπεύθυνες για την μορφή του καθοδικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος κάθε επεισοδίου. Από το σημείο καμψής και μετά, η συνολική απορροή υπολογίζεται από την βασική εξίσωση η οποία περιγράφει το πρότυπο εκθετικής μείωσης : $Q = Q_0 * k$. Ο τρόπος εύρεσης του σημείου καμψής έχει παρουσιασθεί στα κεφάλαια 4 και 5. Επειδή όμως παρατηρημένες τιμές παροχής έχουμε μόνο στο τέλος της λεκάνης και όχι στο τέλος κάθε υπολεκάνης ξεχωριστά, η αρχική τιμή του σημείου καμψής (αναλογία R ως προς

την παροχή αιχμής) θα είναι η ίδια και για τις τρεις υπολεκάνες. Όπως αποδεικνύεται και από την βαθμονόμηση, σε κάθε υπολεκάνη η τιμή της παραμέτρου είναι διαφορετική. Ακριβώς το ίδιο ισχύει και για την σταθερά εκθετικής μείωσης k άρα κρίνεται λογική και αναμενόμενη η διαφορά που παρουσιάζουν τα πλημμυρογραφήματα κάθε επεισοδίου (παρατηρημένο – ημιβαθμονομημένο – βαθμονομημένο) όσον αφορά στην μορφή του καθοδικού τους κλάδου. Το πλημμυρογράφημα που προκύπτει από την ημιβαθμονόμηση (δηλαδή με χρήση βελτιστοποιημένων τιμών μόνο των σταθερών παραμέτρων) θα έδινε πολύ καλύτερα αποτελέσματα εάν είχαμε παρατηρημένες τιμές παροχής και στο τέλος κάθε υπολεκάνης (πχ στη γέφυρα Μεσδανίου) και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης σίγουρα θα ήταν ακόμα πιο αξιόπιστα.

Για τις βελτιστοποιημένες τιμές της σταθεράς εκθετικής μείωσης k παρατηρούμε ότι κινούνται κοντά στο 0.90 με μικρές αυξομειώσεις ανά υπολεκάνη και επεισόδιο βροχόπτωσης κάτι που συνάδει με την γεωλογία της περιοχής που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2. Για τιμές που βρίσκονται στην περιοχή 0.80 – 0.90 περίπου, συμπεραίνουμε ότι η βασική απορροή προέρχεται από την ενδιάμεση απορροή ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 0.90 ότι η βασική απορροή προέρχεται από υπόγεια υδροφορία.

6.2.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥΣ ΔΕΙΚΤΕΣ

Για τον έλεγχο της επιτυχίας ή μη της βαθμονόμησης επιλέξαμε τέσσερις στατιστικούς δείκτες: την τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), τον συντελεστή Nash – Sutcliffe (R^2), το απόλυτο σφάλμα στον συνολικό όγκο (b) και μια ποσοστιαία έκφραση σφάλματος για την παροχή αιχμής (PE) (πίνακας 6-4). Ως γνωστόν, για τον δείκτη R^2 η βέλτιστη τιμή είναι '1' ενώ για όλους τους άλλους δείκτες είναι το '0'.

Αρχικά παρατηρούμε ότι για όλους τους δείκτες υπήρξε μια σημαντική βελτίωση της τιμής τους μετά τη βαθμονόμηση των 'μεταβλητών παραμέτρων' σε όλα τα επεισόδια. Βέβαια η βελτίωση αυτή ήταν αναμενόμενη. Οι δύο πρώτοι δείκτες, RMSE και R^2 αποτελούν μέτρο σφάλματος του συνολικού όγκου και της παροχής αιχμής μεταξύ των πλημμυρογραφημάτων, ο δείκτης b αποτελεί μέτρο σφάλματος

μόνο όσον αφορά στον συνολικό όγκο απορροής ενώ ο δείκτης PE μόνο για την παροχή αιχμής. Χαρακτηριστική είναι η βελτίωση της τιμής του δείκτη b σε όλα τα πλημμυρικά επεισόδια. Η τεράστια αυτή μείωση της τιμής του οφείλεται στο γεγονός ότι οι παράμετροι (μεταβλητές) που βαθμονομούνται με την διαδικασία της αυτόματης βαθμονόμησης (I_a , R , k) ουσιαστικά επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τον ανοδικό κλάδο και την παροχή αιχμής (παράμετρος I_a) καθώς επίσης και τον καθοδικό κλάδο (R , k). Ο συνολικός όγκος απορροής ισούται με το εμβαδό που καλύπτει το εκάστοτε πλημμυρογράφημα, συνεπώς είναι απολύτως λογική η βελτίωση της τιμής του δείκτη b μετά την βαθμονόμηση των εν λόγω παραμέτρων.

Με μια πιο προσεκτική παρατήρηση, αντιλαμβανόμαστε ότι ενώ για όλους τους δείκτες υπάρχει μια αισθητή βελτίωση, σε κάποιους, αυτή είναι πιο έντονη και τείνει να φέρει την τιμή του δείκτη στο βέλτιστο όριό της. Θα πρέπει εδώ να υπενθυμίσουμε ότι για την αυτόματη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκε ως αντικειμενική συνάρτηση το ‘άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών’. Στο πρόγραμμα υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές λύσεις οι οποίες βελτιστοποιούν είτε τον συνολικό όγκο της απορροής είτε την παροχή αιχμής. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι από τη στιγμή που αυτές οι εναλλακτικές βελτιστοποιούν ένα στοιχείο μόνο η καθεμία ίσως θα ήταν ιδιαιτέρως αποδοτική η δημιουργία μιας νέας εναλλακτικής που θα μπορεί να βελτιστοποιεί ταυτόχρονα όλα τα στοιχεία του πλημμυρογραφήματος μέσω των παραμέτρων. Ουσιαστικά δηλαδή μια σύνθεση όλων των υπαρχουσών αντικειμενικών συναρτήσεων.

Μετά την βαθμονόμηση των σταθερών παραμέτρων για κάθε επεισόδιο (ημιβαθμονόμηση), διαπιστώνουμε ότι οι τιμές κάποιων δεικτών είναι αρκετά απομακρυσμένες από την ‘βέλτιστη περιοχή’. Σαφώς, και κατά ένα πολύ μεγάλο ποσοστό, αυτό οφείλεται στο ότι οι υπόλοιπες τρεις παράμετροι διατηρούν τις αρχικές τους τιμές και δεν έχουν βαθμονομηθεί. Σίγουρα όμως οφείλεται και στο γεγονός ότι η βαθμονόμηση με την μέθοδο ‘δοκιμής – σφάλματος’ εμπεριέχει ένα βαθμό αναξιοπιστίας καθώς η επιτυχία της αρχικά κρίνεται κυρίως οπτικά και όχι με κάποιον συγκεκριμένο δείκτη.

Επίσης, πολύ σημαντικό ρόλο στην επιτυχία της προσομοίωσης διαδραματίζουν τα πρωτογενή δεδομένα και ο τρόπος διαχείρισής τους. Παραδείγματος χάρη, σαφώς και αποτελεί τροχοπέδη για την επιτυχή προσομοίωση το γεγονός ότι για δύο από τα επεισόδια βροχόπτωσης είχαμε μόνο τον συνολικό

όγκο βροχής του σταθμού ‘Καρδίτσα’ και όχι την χρονική κατανομή του επεισοδίου. Πηγή σφαλμάτων σίγουρα αποτελεί και το γεγονός ότι θεωρήσαμε κάθε σταθμό αντιπροσωπευτικό της λεκάνης στην οποία εδρεύει. Όλα τα παραπάνω αποτελούν σφάλματα, τα οποία όμως ήταν εξ αρχής εν γνώση μας και μη έχοντας περιθώρια πολλών διαφορετικών επιλογών, κρίναμε ότι βρίσκονται μέσα στα περιθώρια του αποδεκτού και αποφασίσαμε να πορευθούμε με αυτά.

6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί μια μέθοδο με την οποία συμπεραίνουμε ποιές από τις παραμέτρους του μοντέλου ασκούν μικρότερη ή μεγαλύτερη επιρροή στα τελικά αποτελέσματα. Η ανάλυση αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο μεθόδους, είτε μεταβάλλοντας την τιμή μιας και μόνο παραμέτρου διατηρώντας όλες τις άλλες σταθερές και να παρατηρήσουμε τις διαφοροποιήσεις στα τελικά αποτελέσματα είτε μεταβάλλοντας ταυτόχρονα πολλές παραμέτρους. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η πρώτη μέθοδος.

Για την εν λόγω ανάλυση λοιπόν θα πρέπει να επιλέξουμε ένα από τα τρία πλημμυρικά επεισόδια, τις παραμέτρους στις οποίες θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση και την υπολεκάνη στην οποία αυτές θα αναφέρονται. Καταλήξαμε έτσι στα εξής:

Πλημμυρικό επεισόδιο :

- Δεκέμβριος 1989

Παράμετροι :

- χρόνος διόδευσης πλημμυρικού κύματος: K (Muskingum)
- χρόνος υστέρησης: T_p (ή συντελεστής C_t) (Snyder)
- συντελεστής υπολογισμού παροχής αιχμής $M.Y$: C_p (Snyder)
- αρχικές απώλειες: I_a (SCS)
- αναλογία ως προς την παροχή αιχμής: R (εκθετική μείωση βασικής απορροής)
- σταθερά εκθετικής μείωσης: k (εκθετική μείωση βασικής απορροής)

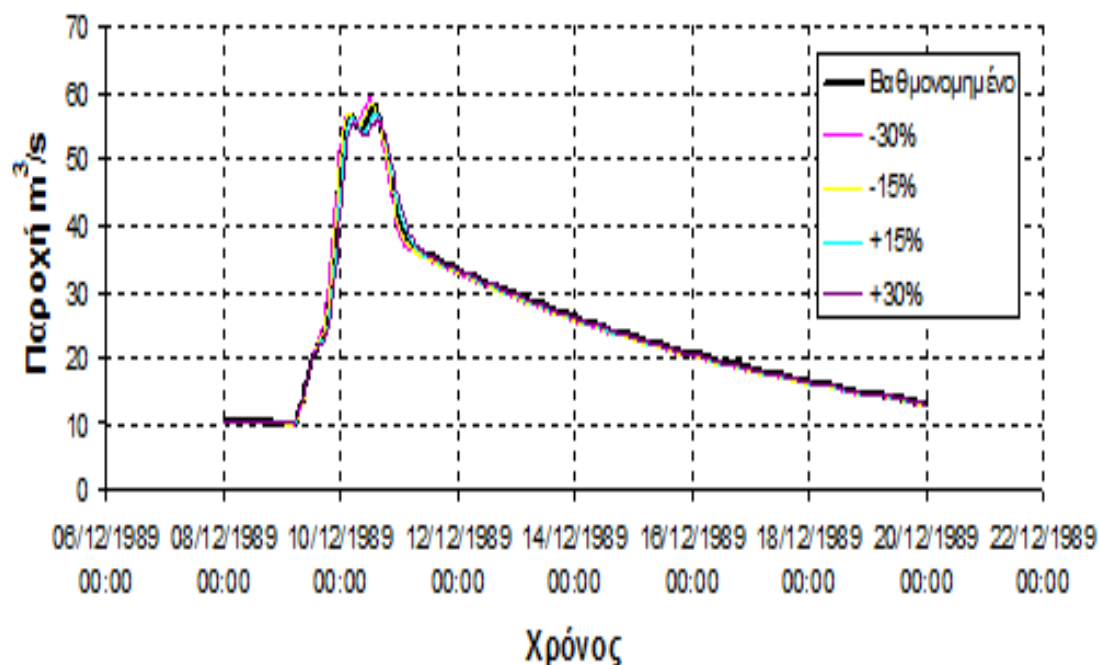
Υπολεκάνη :

- 2η (η λεκάνη όπου εδρεύει ο σταθμός ‘γέφυρα Αλή Εφέντη’)

Για κάθε μια από τις επιλεγμένες παραμέτρους θα μεταβάλλουμε την τιμή της σταδιακά κατά -30%, -15%, +15%, +30% και θα παρουσιάζουμε διαγραμματικά τις μεταβολές που αυτή η αλλαγή επιφέρει στο πλημμυρογράφημα. Να σημειώσουμε εδώ, ότι ως πλημμυρογράφημα – βάση θα χρησιμοποιούμε το πλήρως βαθμονομημένο πλημμυρογράφημα.

6.3.1 Κ (MUSKINGUM)

Η βαθμονομημένη τιμή της παραμέτρου Κ του υδατορεύματος 2 (υπολεκάνη 2) είναι 8.00 hrs. Στο διάγραμμα 6-10 παρουσιάζονται το βαθμονομημένο πλημμυρογράφημα και τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν από την μεταβολή της τιμής του Κ κατά -30%, -15%, +15%, +30% :



Διάγραμμα 6-10 : Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από την μεταβολή του Κ κατά -30%, -15%, +15%, +30%.

Από το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνουμε ότι αυξομειώσεις στην τιμή του K επιφέρουν πολύ μικρές μεταβολές στο πλημμυρογράφημα οι οποίες έχουν να κάνουν κυρίως με τον χρόνο. Παρατηρούμε ότι όσο πιο πολύ μειώνεται ο χρόνος διάδευσης K τόσο πιο αριστερά μετατοπίζεται το πλημμυρογράφημα κάτι που είναι λογικό καθώς η παράμετρος K αντιπροσωπεύει τον χρόνο που χρειάζεται το πλημμυρικό κύμα για να διανύσει το κομμάτι του υδατορεύματος που αντιστοιχεί στην επιλεγμένη λεκάνη. Έτσι λοιπόν είναι απολύτως αναμενόμενο η αιχμή να εμφανίζεται πιο σύντομα για την μειωμένη τιμή του K κατά 30% και με μεγαλύτερη καθυστέρηση για την κατά 30% αυξημένη τιμή του.

Στον πίνακα 6-5 παραθέτουμε κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία των πλημμυρογραφημάτων:

Muskingum K	Βαθμονομημένο K=8,00 hrs	-30%	-15%	+15%	+30%
Αιχμή (m³/sec)	57.60	59.10	58.50	56.7	55.7
Ώρα αιχμής	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 12:30	10Δεκ89 13:00	10Δεκ89 15:00	10Δεκ89 15:30
Συνολική απορροή (m³)	25129000	25106300	25117700	25140000	25151100
Συνολική απορροή (mm)	8.72	8.71	8.72	8.72	8.73

Πίνακας 6-5 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από μεταβολή του K κατά -30%, -15%, +15%, +30%.

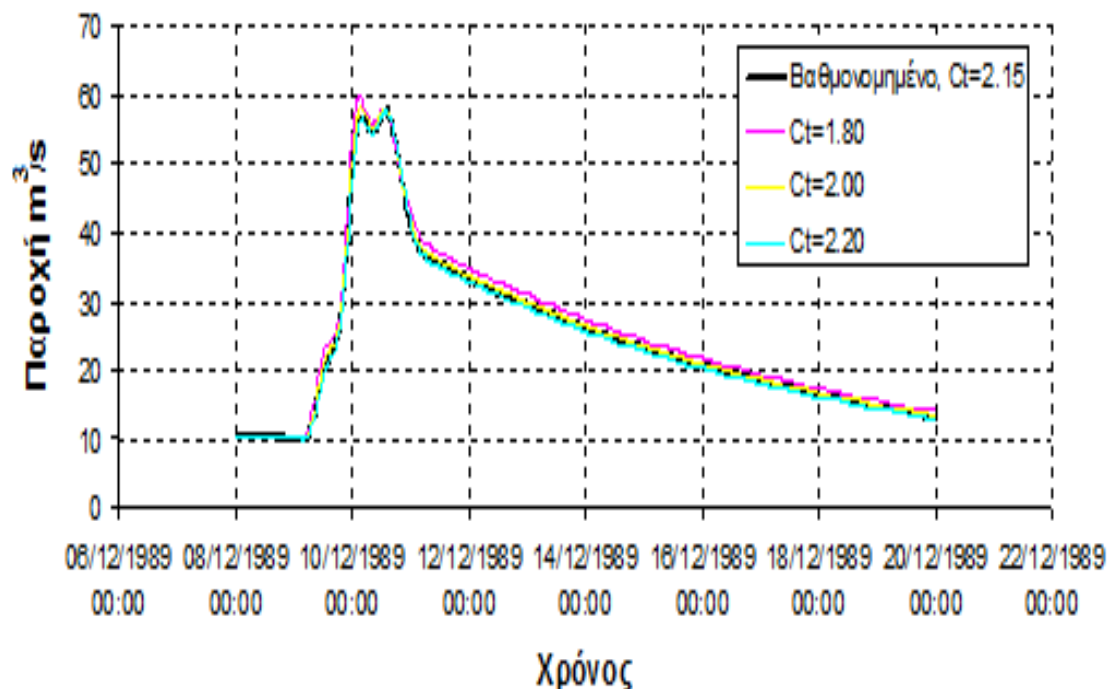
Από τον πίνακα 6-5 παρατηρούμε την προαναφερθείσα χρονική μετατόπιση του πλημμυρογραφήματος και κατά συνέπεια και της αιχμής. Όσο αυξάνεται ο χρόνος K αυξάνεται και η χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και αυτή καθαυτή η τιμή της. Σημειώνουμε ότι για την αύξηση του K κατά 30 % δηλαδή κατά 2 ώρες και 24 λεπτά παρατηρείται καθυστερημένη εμφάνιση της αιχμής κατά 1 ώρα και 30 λεπτά. Ακριβώς το αντίστροφο ισχύει για μείωση του K κατά 2 ώρες και 24 λεπτά όπου εκεί η αιχμή εμφανίζεται νωρίτερα αυτή τη φορά κατά 1 ώρα και 30 λεπτά. Οι αυξομειώσεις στην τιμή της παροχής αιχμής φτάνουν

έως περίπου το $\pm 3\%$. Ασήμαντη μεταβολή παρουσιάζει και ο συνολικός όγκος απορροής, μια μεταβολή της τάξεως του 0.1%.

Στα διαγράμματα 6-16 έως 6-19 παρουσιάζονται για όλες τις παραμέτρους, οι μεταβολές (διαφορές και % διαφορές) που προκαλούνται στις τελικές τιμές παροχής συγκριτικά με τις βαθμονομημένες, για δεδομένη χρονική στιγμή t , από την αύξηση και μείωση των παραμέτρων κατά 30%. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά παροχών που παρουσιάζεται είναι περίπου $6 \text{ m}^3/\text{sec}$ δηλαδή της τάξεως του 18% περίπου.

6.3.2 ΧΡΟΝΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ T_p (SNYDER)

Η βαθμονομημένη τιμή της παραμέτρου T_p της υπολεκάνης 2 είναι 10.10 hrs ($Ct=2.15$). Στο διάγραμμα 6-11 παρουσιάζονται το βαθμονομημένο πλημμυρογράφημα και τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν από τις τιμές του συντελεστή Ct : 1.80 , 2.00 και 2.20 μιας και αυτά είναι τα επιτρεπόμενα όρια μέσα στα οποία πρέπει να βρίσκεται η τιμή του.



Διάγραμμα 6-11 : Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από τις τιμές του Ct : 1.80 , 2.00 και 2.20

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η τιμή του συντελεστή C_t άρα και του χρόνου υστέρησης T_p τόσο αυξάνεται ο συνολικός όγκος απορροής και το πλημμυρογράφημα μετατοπίζεται προς τα πάνω. Επίσης για μικρές τιμές του χρόνου υστέρησης η αιχμή εμφανίζεται πιο νωρίς. Να σημειώσουμε εδώ ότι ο χρόνος υστέρησης ισούται με τον χρόνο που χρειάζεται μια σταγόνα νερού να φτάσει από το πιο απομακρυσμένο υδραυλικά σημείο της λεκάνης στην έξοδό της.

Στον πίνακα 6-6 παραθέτουμε κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία των πλημμυρογραφημάτων:

Standard Lag T_p	Βαθμονομημένο $T_p=10.10$ hrs	$C_t=1.80$ $T_p=8.44$	$C_t=2.00$ $T_p=9.38$	$C_t=2.20$ $T_p=10.32$
Αιχμή (m^3/sec)	57.60	60.20	58.40	57.60
Ώρα αιχμής	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 03:00	10Δεκ89 03:30	10Δεκ89 14:00
Συνολική απορροή (m^3)	25129000	26519300	25687500	24974200
Συνολική απορροή (mm)	8.72	9.20	8.91	8.67

Πίνακας 6-6 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από τις τιμές του C_t : 1.80 , 2.00 και 2.20

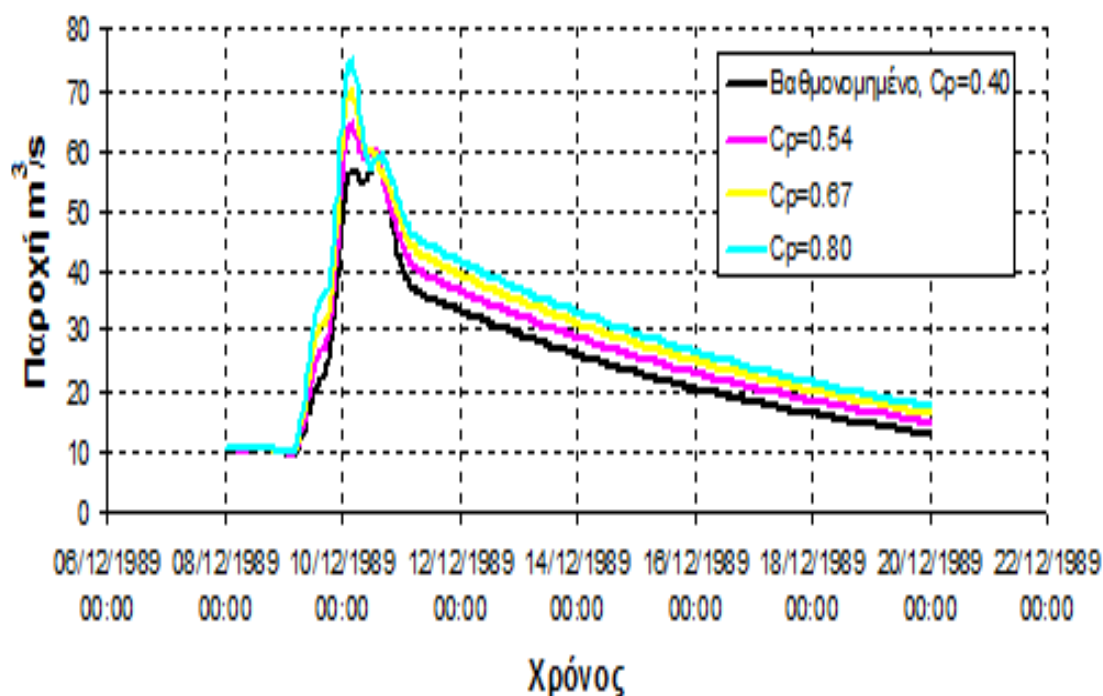
Η παροχή αιχμής παρουσιάζει μια μείωση της τάξεως του 4,5% (διαφορά: 2.6 m^3/sec) για την τιμή $C_t=1.80$. Παρατηρούμε επίσης ότι για τις τιμές του C_t : 1.80 και 2.00 το χρονικό σημείο εμφάνισης της αιχμής αλλάζει. Παρατηρείται ανύψωση της προηγούμενης αιχμής η οποία και γίνεται για τις τιμές αυτές του C_t , συνολική αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Μείωση του χρόνου υστέρησης συνεπάγεται ταχύτερη έξοδο του όγκου του νερού από την λεκάνη απορροής άρα αυξημένη παροχή αιχμής και ταχύτερη εμφάνισή της. Πόσο μάλλον όταν αναφερόμαστε σε μείωση του χρόνου υστέρησης της 2^{ης} υπολεκάνης στην οποία βρίσκεται και η έξοδος της λεκάνης. Επίσης όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, όσο μικρότερη είναι η τιμή του χρόνου υστέρησης τόσο αυξάνεται και ο όγκος του πλημμυρογραφήματος. Για την τιμή

$C_t=1.80$ (συγκριτικά με το βαθμονομημένο) παρατηρούμε μια αύξηση του όγκου κατά 5.5% περίπου (1390300 m^3).

Τέλος, από τα διαγράμματα 6-16 έως 6-19 παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά που εμφανίζεται για την ίδια χρονική στιγμή είναι περίπου $6 \text{ m}^3/\text{sec}$ δηλαδή της τάξεως του 19% περίπου.

6.3.3 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ C_p (SNYDER)

Η βαθμονομημένη τιμή της παραμέτρου C_p (peaking coefficient) της υπολεκάνης 2 είναι 0.40. Στο διάγραμμα 6-12 παρουσιάζονται το βαθμονομημένο πλημμυρογράφημα και τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν από τις τιμές του συντελεστή C_p : 0.54 , 0.67 και 0.80 μιας και αυτά είναι τα επιτρεπόμενα όρια μέσα στα οποία πρέπει να βρίσκεται η τιμή του.



Διάγραμμα 6-12 : Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από τις τιμές του C_p : 0.54 , 0.67 και 0.80

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή του συντελεστή C_p τόσο αυξάνεται ο συνολικός όγκος απορροής και το

πλημμυρογράφημα μετατοπίζεται προς τα πάνω. Η μεταβολή αυτή ήταν αναμενόμενη καθώς σύμφωνα με τους Bedient and Huber, (1992) υψηλές τιμές του C_t αντιστοιχούν σε χαμηλές τιμές του C_p . Άρα σαν μεταβολή όγκου, οι χαμηλές τιμές του C_p θα παράγουν κάτι αντίστοιχο με τις υψηλές του C_t . Πρέπει εδώ να προσθέσουμε ότι ο συντελεστής C_p χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της παροχής αιχμής του μοναδιαίου υδρογραφήματος.

Στον πίνακα 6-7 παραθέτουμε κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία των πλημμυρογραφημάτων:

Peaking Coefficient C_p	Βαθμονομημένο $C_p=0.40$	$C_p=0.54$	$C_p=0.67$	$C_p=0.80$
Αιχμή (m^3/sec)	57.60	64.30	70.10	74.90
Ωρα αιχμής	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 04:00	10Δεκ89 03:30	10Δεκ89 03:30
Συνολική απορροή (m^3)	25129000	27798100	29870800	31565500
Συνολική απορροή (mm)	8.72	9.65	10.36	10.95

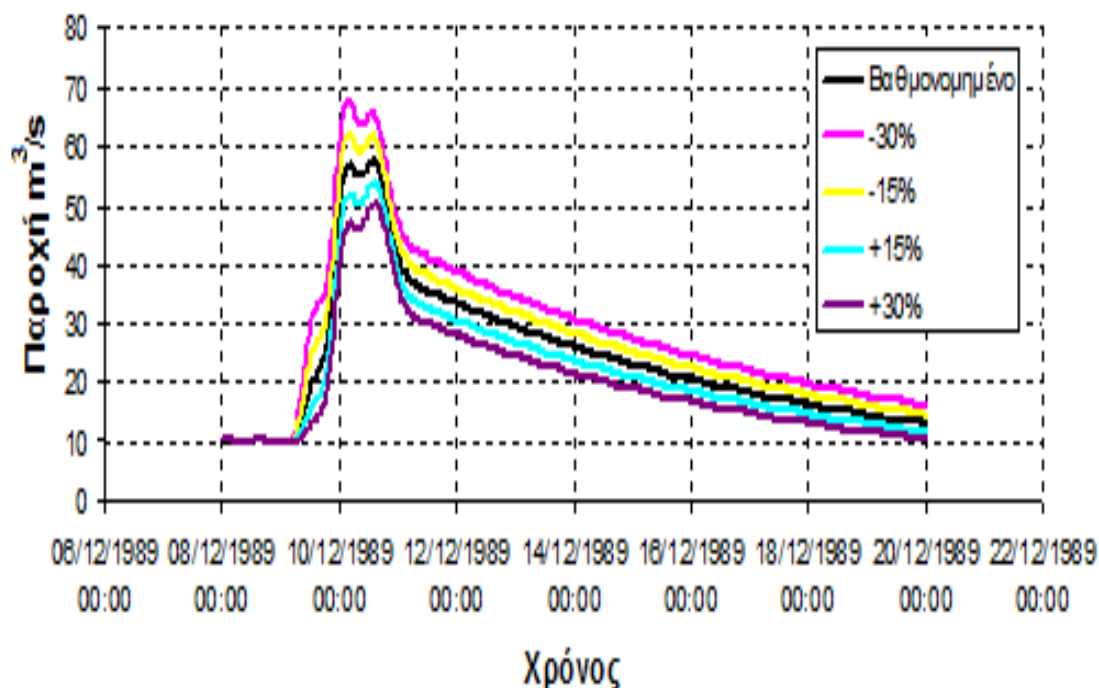
Πίνακας 6-7 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από τις τιμές του C_p : 0.54 , 0.67 και 0.80

Οι διαφορές στην παροχή αιχμής για τις διαφορετικές τιμές του συντελεστή C_p είναι εμφανέστατες. Για την μέγιστη τιμή του (0.80), συγκριτικά με την παροχή αιχμής του βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος παρουσιάζεται μια αύξηση κατά $17.3 m^3/sec$ (30%). Ομοίως όπως και στον χρόνο υστέρησης, από κάποια τιμή του C_p και μετά, παρατηρείται ανύψωση της πρώτης χρονολογικά αιχμής και αποτελεί πλέον αυτή την αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη αυτή παίζει το ότι αναφερόμαστε στις μεταβολές παραμέτρων της 2^{ης} υπολεκάνης στην οποία βρίσκεται η έξοδος της λεκάνης. Όσον αφορά στον συνολικό όγκο απορροής, για την τιμή $C_p=0.80$ συγκριτικά με την τιμή 0.40, αυξάνεται κατά 25.6% περίπου ($6436500 m^3$).

Τέλος, από τα διαγράμματα 6-16 έως 6-19 παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά που εμφανίζεται για την ίδια χρονική στιγμή είναι περίπου $18\text{m}^3/\text{sec}$ δηλαδή της τάξεως του 60% περίπου.

6.3.4 ΑΡΧΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ I_a (SCS)

Η βαθμονομημένη τιμή της παραμέτρου I_a της υπολεκάνης 2 είναι 14.45mm . Στο διάγραμμα 6-13 παρουσιάζονται το βαθμονομημένο πλημμυρογράφημα και τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν από την μεταβολή της τιμής του I_a κατά -30%, -15%, +15%, +30% :



Διάγραμμα 6-13 : Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από την μεταβολή του I_a κατά -30%, -15%, +15%, +30%.

Το διάγραμμα 6-13 είναι χαρακτηριστικό του πόσο σημαντική είναι η συγκεκριμένη παράμετρος και πόσο πολύ επηρεάζουν οι μεταβολές της τιμής της το τελικό πλημμυρογράφημα. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνονται οι αρχικές απώλειες, μειώνεται και ο συνολικός όγκος απορροής και το πλημμυρογράφημα μετατοπίζεται σταδιακά προς τα κάτω. Επίσης με την αύξηση των αρχικών απωλειών παρατηρείται και μια καθυστερημένη εμφάνιση του ανοδικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος κάτι που

είναι αναμενόμενο καθώς χρειάζεται πρώτα να καλυφθεί το ύψος των απωλειών για να ξεκινήσει και η άμεση απορροή.

Στον πίνακα 6-8 παραθέτουμε κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία των πλημμυρογραφημάτων:

Initial abstraction I_α	Βαθμονομημένο I_α=14.45 mm	-30%	-15%	+15%	+30%
Αιχμή (m³/sec)	57.60	68.00	62.30	54.00	50.50
Ωρα αιχμής	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 04:00	10Δεκ89 04:00	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 14:30
Συνολική απορροή (m³)	25129000	29827700	27414000	22970400	20971600
Συνολική απορροή (mm)	8.72	10.35	9.51	7.97	7.28

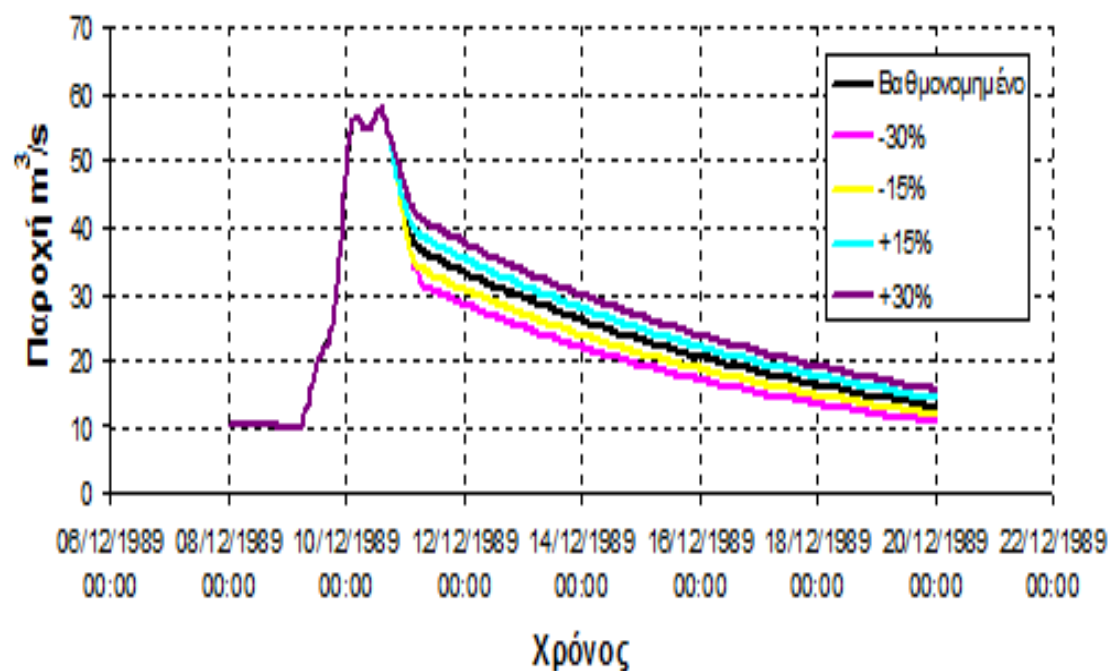
Πίνακας 6-8 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από μεταβολή του I_α κατά -30%, -15%, +15%, +30%.

Για μια αύξηση των αρχικών απωλειών κατά 30% παρατηρείται μείωση της παροχής αιχμής κατά 12.3% (7.1 m³/sec), ενώ για μείωση των I_α κατά 30% παρατηρείται αύξηση της αιχμής κατά 18% (10.4 m³/sec). Επίσης όσο μειώνονται οι αρχικές απώλειες τόσο αυξάνεται και η πρώτη χρονολογικά αιχμή του διαγράμματος και για τις μειώσεις 15% και 30% γίνεται αυτή η αιχμή του πλημμυρογραφήματος. Η ανομοιόμορφη αυτή αύξηση του όγκου είναι φυσιολογική καθώς δεν πρέπει να παρακάμπτουμε το γεγονός ότι αναφερόμαστε στις απώλειες που εντοπίζονται στην 2^η υπολεκάνη η οποία είναι και η πιο κοντινή στην έξοδο της λεκάνης όπου και μετριέται η παροχή. Οι όποιες δηλαδή μεταβολές θα προκληθούν στο πλημμυρογράφημα, θα εμφανίζονται πιο έντονα στο ξεκίνημά του. Όσον αφορά στον συνολικό όγκο, παρουσιάζει για αύξηση των απωλειών (30%) μια μείωση της τάξεως του 16.5%, ενώ για μείωση των απωλειών (30%) μια αύξηση της τάξεως του 18.7%.

Τέλος, από τα διαγράμματα 6-16 έως 6-19 παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά που εμφανίζεται για την ίδια χρονική στιγμή είναι περίπου $11.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ δηλαδή της τάξεως του 54% περίπου.

6.3.5 ΑΝΑΛΟΓΙΑ R ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ ΑΙΧΜΗΣ (ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ)

Η βαθμονομημένη τιμή της παραμέτρου R της υπολεκάνης 2 είναι 0,57. Στο διάγραμμα 6-14 παρουσιάζονται το βαθμονομημένο πλημμυρογράφημα και τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν από την μεταβολή της τιμής του R κατά -30%, -15%, +15%, +30% :



Διάγραμμα 6-14 : Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από την μεταβολή του R κατά -30%, -15%, +15%, +30%.

Από το διάγραμμα 6-14 είναι εμφανές ότι η οποιαδήποτε μεταβολή της παραμέτρου R, προκαλεί μια αντίστοιχη μετατόπιση του καθοδικού κλάδου του πλημμυρογραφήματος μετά το σημείο καμψής και καμία άλλη διαφοροποίηση. Αύξηση του R συνεπάγεται αύξηση του συνολικού όγκου και μετατόπιση του καθοδικού κλάδου προς τα πάνω.

Στον πίνακα 6-9 παραθέτουμε κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία των πλημμυρογραφημάτων:

Ratio to peak R	Βαθμονομημένο R=0.57	-30%	-15%	+15%	+30%
Αιχμή (m³/sec)	57.60	57.60	57.60	57.60	57.60
Ωρα αιχμής	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 14:00
Συνολική απορροή (m³)	25129000	22388600	23667700	26443600	2796380
Συνολική απορροή (mm)	8.72	7.77	8.21	9.18	9.69

Πίνακας 6-9 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από μεταβολή του R κατά -30%, -15%, +15%, +30%.

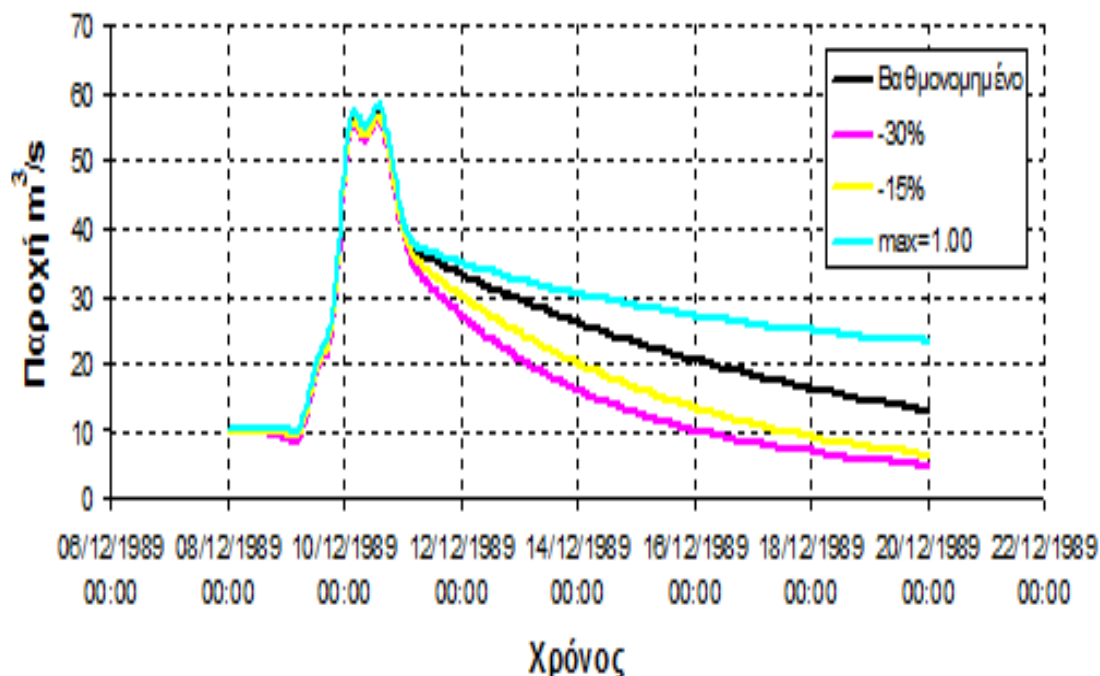
Τα αρχικά συμπεράσματα που προέκυψαν από μια πρώτη ανάλυση των πλημμυρογραφημάτων, επαληθεύονται και μέσω του πίνακα 6-9. Παρατηρούμε ότι παροχή αιχμής και η χρονική στιγμή εμφάνισής της είναι ανεξάρτητες από τις οποιοσδήποτε αυξομειώσεις της παραμέτρου R. Βέβαια, με την μετατόπιση του καθοδικού κλάδου έχουμε μεταβολές στον συνολικό όγκο απορροής. Για μείωση του R (30%) παρατηρείται μείωση του συνολικού όγκου κατά 10.9% ενώ για μια αντίστοιχη αύξηση του R (30%), παρατηρείται αύξηση του όγκου κατά 11.1%.

Τέλος, από τα διαγράμματα 6-16 έως 6-19 παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά που εμφανίζεται για την ίδια χρονική στιγμή είναι περίπου 5 m³/sec δηλαδή της τάξεως του 20% περίπου.

6.3.6 ΣΤΑΘΕΡΑ ΕΚΘΕΤΙΚΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ k (ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ)

Η βαθμονομημένη τιμή της παραμέτρου k (recession constant) της υπολεκάνης 2 είναι 0.92. Στο διάγραμμα 6-15 παρουσιάζονται το βαθμονομημένο πλημμυρογράφημα και τα πλημμυρογραφήματα που προκύπτουν από την μεταβολή

της τιμής του k κατά -30%, -15% και από την τιμή $k = 1.00$ αφού αυτό είναι το πάνω όριό του.



Διάγραμμα 6-15 : Σύγκριση βαθμονομημένου πλημμυρογραφήματος με αυτά που προκύπτουν από την μεταβολή του k κατά -30%, -15% και από την μέγιστη τιμή του $k = 1.00$

Από το διάγραμμα 6-15 συμπεραίνουμε ότι η μεταβολή της παραμέτρου k προκαλεί σημαντικές αλλαγές κυρίως στον καθοδικό κλάδο του πλημμυρογραφήματος, μετά το σημείο καμπής. Οι αλλαγές αυτές αφορούν στην κλίση του κλάδου σε μεγάλο βαθμό και σε ένα μικρότερο, στην παροχή αιχμής και στο κομμάτι του πλημμυρογραφήματος πριν τον ανοδικό κλάδο. Οι αλλαγές της κλίσης των κλάδων μετά το σημείο καμπής και πριν την έναρξη του ανοδικού κλάδου, είναι αναμενόμενες καθώς η σταθερά εκθετικής μείωσης εκφράζει την κλίση των κομματιών αυτών.

Στον πίνακα 6-10 παραθέτουμε κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία των πλημμυρογραφημάτων:

Recession constant k	Βαθμονομημένο k=0.92	-30%	-15%	Max k=1.00
Αιχμή (m³/sec)	57.60	56.00	56.70	58.40
Ωρα αιχμής	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 14:00	10Δεκ89 14:00
Συνολική απορροή (m³)	25129000	17985100	20394200	29772200
Συνολική απορροή (mm)	8.72	6.24	7.08	10.33

Πίνακας 6-10 : Χαρακτηριστικά στοιχεία πλημμυρογραφημάτων που προκύπτουν από μεταβολή του k κατά -30%, -15% και από την μέγιστη τιμή k =1.00

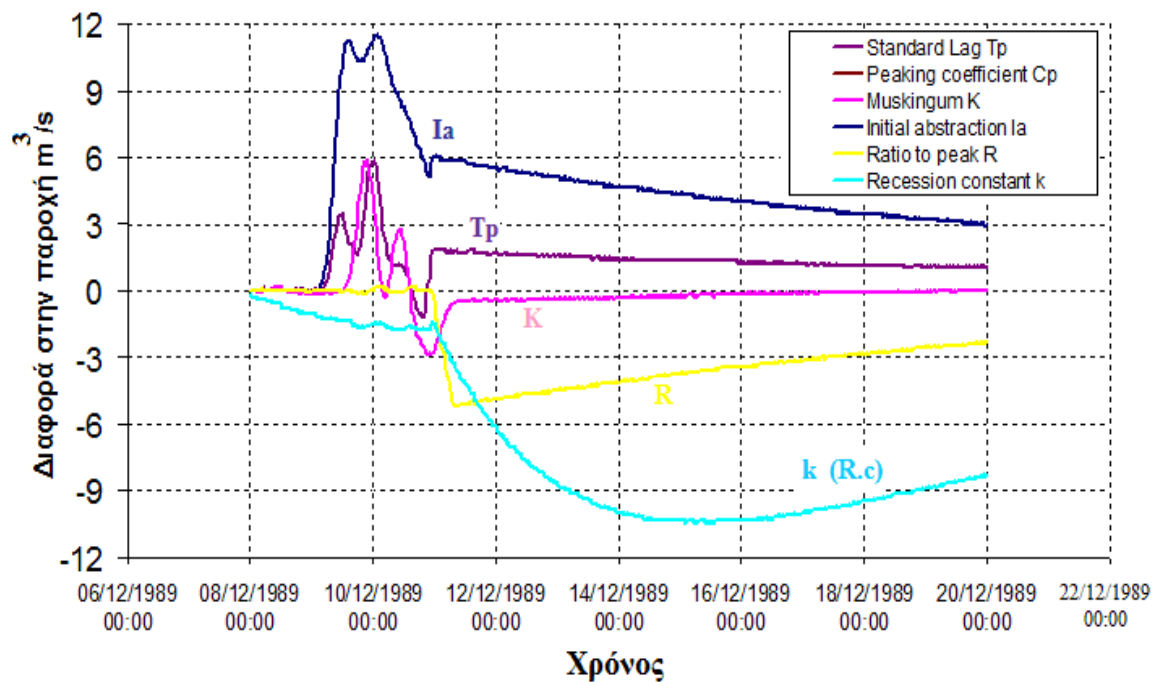
Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι ενώ η χρονική στιγμή εμφάνισης της αιχμής είναι ανεξάρτητη από τις αυξομειώσεις του k, δεν συμβαίνει το ίδιο και με την τιμή της παροχής της καθώς επίσης και με τον συνολικό όγκο. Μείωση του k κατά 30% επιφέρει μείωση της παροχής αιχμής κατά 2.8% (1.6 m³/sec) και του όγκου κατά 28.4% . Αύξηση του k στην ανώτατη τιμή του 1.00 προκαλεί αύξηση της παροχής αιχμής κατά 1.4% (0.6 m³/sec) και του όγκου κατά 18.5%.

Παρατηρώντας την κλίση των μεταβαλλόμενων κλάδων διαπιστώνουμε ότι αυτή δεν ισούται με την τιμή του k. Παραδείγματος χάρη, για την τιμή του k=1.00 ο κλάδος δεν είναι μια ευθεία γραμμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή αυτή του k αντιστοιχεί στην σταθερά εκθετικής μείωσης μόνο της 2^{ης} υπολεκάνης και σαφώς η τελική κλίση του κλάδου του συνολικού πλημμυρογραφήματος εξαρτάται και από τις τιμές του k και για τις άλλες δύο υπολεκάνες.

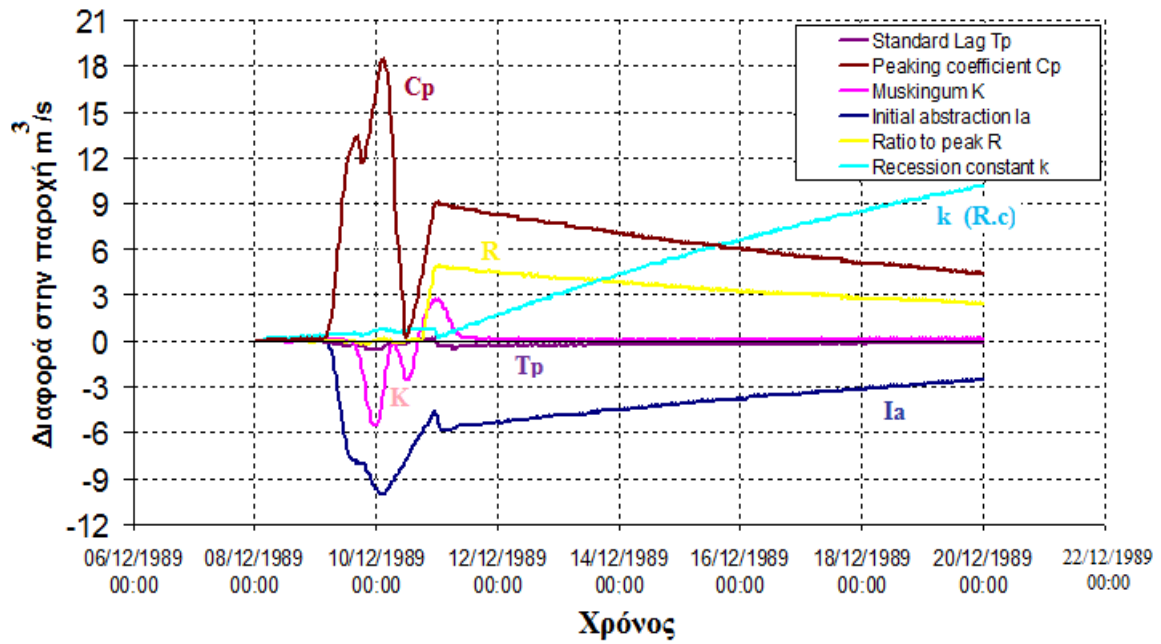
Τέλος, από τα διαγράμματα 6-16 έως 6-19 παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη διαφορά που εμφανίζεται για την ίδια χρονική στιγμή είναι περίπου 10.5 m³/sec δηλαδή της τάξεως του 78% περίπου.

6.3.7 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΠΑΡΟΧΩΝ (ΚΑΙ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΕΣ)

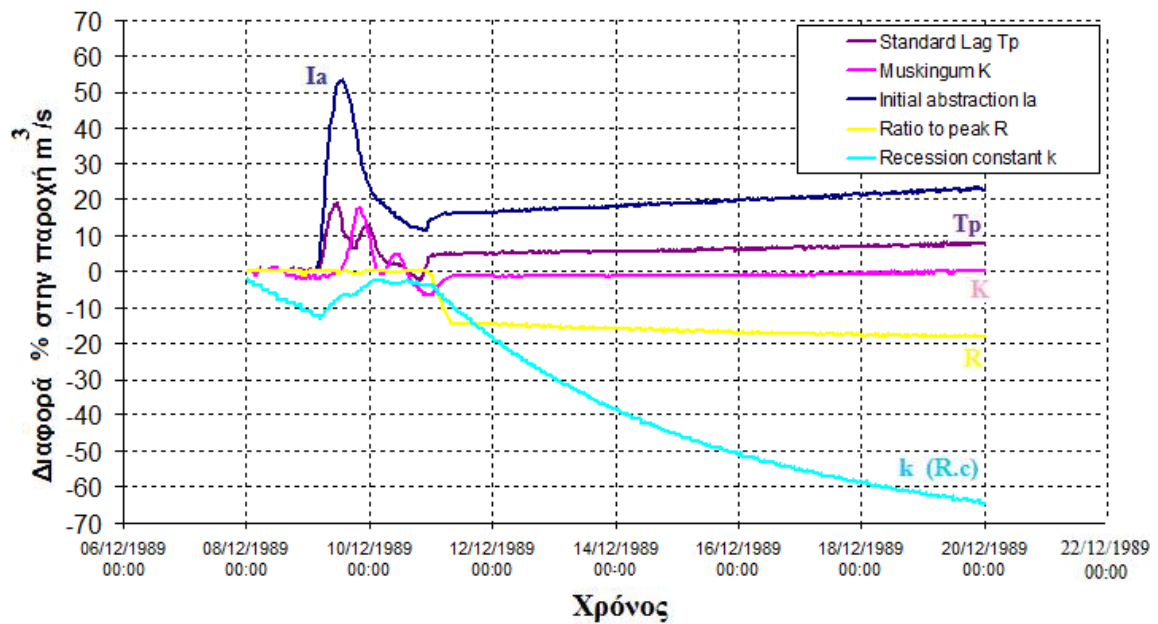
Για κάθε παράμετρο επιλέξαμε τα πλημμυρογραφήματα που προκλήθηκαν από τις ακραίες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας (-30% , +30% ή κατώτατα – ανώτατα όρια). Σε κάθε πλημμυρογράφημα ξεχωριστά υπολογίσαμε τις διαφορές των παροχών του από αυτές του βαθμονομημένου για τις ίδιες χρονικές στιγμές. Οι διαφορές αυτές και σαν μονάδες παροχής αλλά και ως ποσοστά παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα. Ο οριζόντιος άξονας του 0 δηλώνει ότι η διαφορά των πλημμυρογραφημάτων είναι μηδενική (συμπίπτουν) ενώ οι αρνητικές διαφορές παροχής υποδηλώνουν ότι οι τιμές παροχής του πλημμυρογραφήματος που προήλθε από την μεταβολή μιας παραμέτρου είναι μικρότερες από αυτές του βαθμονομημένου στην δεδομένη χρονική στιγμή.



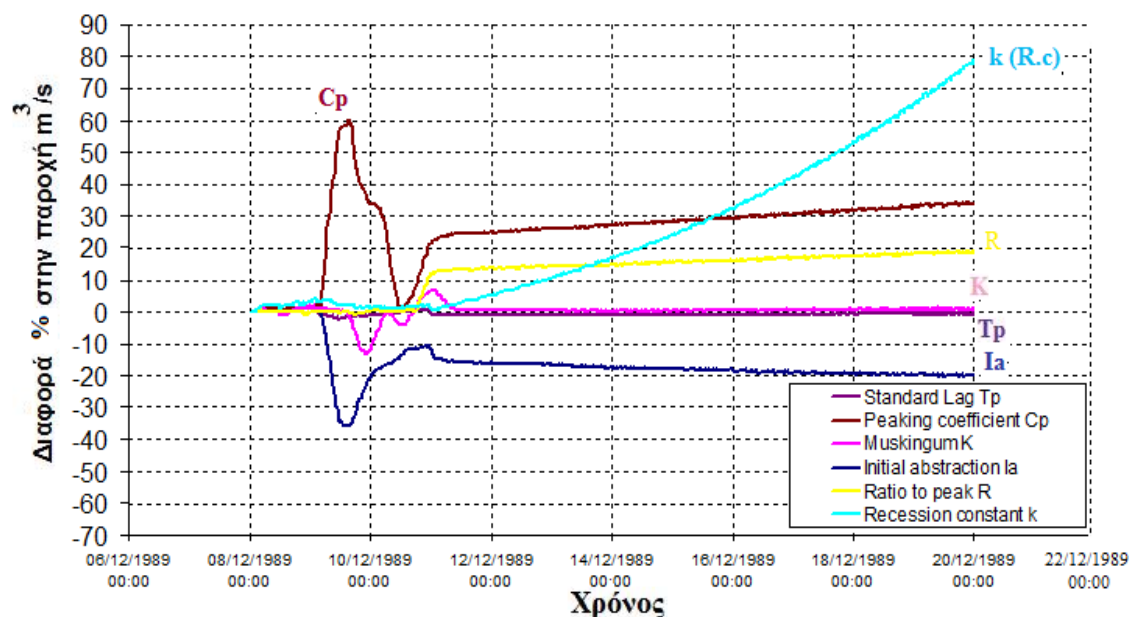
Διάγραμμα 6-16 : Σύγκριση των διαφορών στις παροχές μεταξύ πλημμυρογραφημάτων που προήλθαν από μείωση της παραμέτρου κατά 30% (ή αντίστοιχα μείωση έως την ελάχιστη τιμή της) με βάση το βαθμονομημένο.



Διάγραμμα 6-17 : Σύγκριση των διαφορών στις παροχές μεταξύ πλημμυρογραφημάτων που προήλθαν από αύξηση της παραμέτρου κατά 30% (ή αντίστοιχα αύξηση έως την μέγιστη τιμή της) με βάση το βαθμονομημένο.



Διάγραμμα 6-18 : Σύγκριση των ποσοστιαίων διαφορών στις παροχές μεταξύ πλημμυρογραφημάτων που προήλθαν από μείωση της παραμέτρου κατά 30% (ή αντίστοιχα μείωση έως την ελάχιστη τιμή της) με βάση το βαθμονομημένο.



Διάγραμμα 6-19 : Σύγκριση των ποσοστιαίων διαφορών στις παροχές μεταξύ πλημμυρογραφημάτων που προήλθαν από αύξηση της παραμέτρου κατά 30% (ή αντίστοιχα αύξηση έως την μέγιστη τιμή της) με βάση το βαθμονομημένο.

6.4 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με κάποιες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα έτσι ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων στα οποία καταλήξαμε και να προχωρήσει η αρχική προσπάθεια αυτή ένα βήμα πιο μπροστά. Οι προτάσεις αυτές αφορούν στα πρωτογενή δεδομένα και την διαχείρισή τους, στις παραμέτρους των μαθηματικών προτύπων του μοντέλου και στην χρήση των παρόντων συμπερασμάτων σε παραπλήσιες έρευνες.

- Πρωτογενή δεδομένα και διαχείριση:

Στην παρούσα μελέτη, χωρίσαμε την λεκάνη απορροής σε τρεις υπολεκάνες και για κάθε μια θεωρήσαμε αντιπροσωπευτικό τον βροχογράφο ο οποίος εδρεύει σε αυτήν. Ουσιαστικά δηλαδή δεν κάναμε επιφανειακή ολοκλήρωση των σημειακών βροχομετρικών δεδομένων λόγω έλλειψης περισσότερων σταθμών με

καταγεγραμμένα επεισόδια . Πολλές δοκιμές θα μπορούσαν να γίνουν δίνοντας διαφορετικά ποσοστά βάρους για κάθε υπολεκάνη σε κάθε σταθμό.

- Παράμετροι μαθηματικών προτύπων:

Στην συγκεκριμένη εργασία θεωρήσαμε τις παραμέτρους I_a (αρχικές απώλειες), R (αναλογία ως προς την παροχή αιχμής) και k (σταθερά εκθετικής μείωσης) μεταβλητές και ότι οι τιμές τους για κάθε επεισόδιο είναι διαφορετικές. Θα μπορούσαμε σε μια νέα εργασία, να κάνουμε την βαθμονόμηση σε όλες τις παραμέτρους ταυτόχρονα και στη συνέχεια να τις θεωρήσουμε όλες σταθερές για οποιοδήποτε επεισόδιο. Έτσι ουσιαστικά θα είμαστε σε θέση μετά την εύρεση των σταθερών τιμών τους μέσω της βαθμονόμησης να παράγουμε το πλημμυρογράφημα οποιουδήποτε επεισοδίου βροχόπτωσης χωρίς να χρειαζόμαστε τις παρατηρημένες τιμές παροχής. Για τις αρχικές απώλειες μπορούμε να βγάλουμε ένα μέσο όρο κατά την διάρκεια κάποιων χρόνων και υπό διαφορετικές υγρασιακές καταστάσεις του εδάφους. Το ίδιο μπορούμε να πράξουμε και για τις άλλες δυο παραμέτρους. Αφού δουλέψουμε πάνω σε πολλά επεισόδια βροχόπτωσης να δούμε που τείνουν οι τιμές τους και αφού ολοκληρώσουμε και την βαθμονόμηση μαζί με τις άλλες παραμέτρους, πλέον θα τις χρησιμοποιούμε ως σταθερές. Κάτι ανάλογο μπορούμε να κάνουμε και για την αρχική απορροή η οποία στην παρούσα εργασία εξομοιώθηκε με την παρατηρημένη αρχική απορροή.

- Χρήση παρόντων συμπερασμάτων για παραπλήσιες έρευνες:

Θα ήταν πολύ ενδιαφέρον αν στο βαθμονομημένο πλέον μοντέλο που δημιουργήσαμε, εισήγαμε ένα πρόσφατο επεισόδιο βροχόπτωσης. Οι παρατηρήσεις για το πόσο καλά μπορεί να προσομοιώσει ένα μοντέλο που δημιουργήθηκε με δεδομένα προ 20 περίπου ετών την απόκριση της λεκάνης σε σημερινά επεισόδια θα έδινε τροφή για νέα έρευνα και σχολιασμό. Επίσης εξίσου μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε η εισαγωγή στο μοντέλο της πλημμύρας σχεδιασμού για να διαπιστώσουμε κατά πόσο το μοντέλο μας μπορεί να προσομοιώσει την απόκριση της λεκάνης στο επεισόδιο αυτό.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A.1 ΥΨΗ ΒΡΟΧΗΣ (mm)

A.1.1 ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 7 – 10 ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 1989

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ / ΩΡΑ	ΜΕΓΑΛΗ ΚΕΡΑΣΙΑ	ΚΑΡΔΙΤΣΑ	ΔΡΑΚΟΤΡΥΠΑ
07/12/1989 20:00	0.00	0.00	0.00
07/12/1989 20:30	0.00	0.00	0.02
07/12/1989 21:00	0.00	0.00	0.14
07/12/1989 21:30	0.00	0.00	0.46
07/12/1989 22:00	0.55	0.00	0.32
07/12/1989 22:30	1.01	0.00	0.41
07/12/1989 23:00	0.96	0.00	0.24
07/12/1989 23:30	0.24	0.00	0.33
08/12/1989 00:00	0.00	0.00	0.62
08/12/1989 00:30	0.00	0.00	7.26
08/12/1989 01:00	0.00	0.05	0.00
08/12/1989 01:30	0.00	0.04	0.00
08/12/1989 02:00	0.00	0.30	0.00
08/12/1989 02:30	0.00	0.80	0.00
08/12/1989 03:00	0.00	0.16	0.00
08/12/1989 03:30	0.00	0.00	0.00
08/12/1989 04:00	0.00	0.00	0.00
08/12/1989 04:30	0.00	0.00	0.00
08/12/1989 05:00	0.04	0.00	0.00
08/12/1989 05:30	0.09	0.00	0.00
08/12/1989 06:00	0.12	0.00	0.00
08/12/1989 06:30	0.27	0.00	0.00
08/12/1989 07:00	0.22	0.00	0.00
08/12/1989 07:30	0.08	0.00	0.00
08/12/1989 08:00	0.00	0.00	0.00
08/12/1989 08:30	0.02	0.00	0.00
08/12/1989 09:00	0.00	0.00	0.00
08/12/1989 09:30	0.00	0.00	0.00
08/12/1989 10:00	0.00	0.00	0.00
08/12/1989 10:30	0.00	0.03	0.00
08/12/1989 11:00	0.06	0.87	0.00
08/12/1989 11:30	0.35	0.00	0.00
08/12/1989 12:00	0.06	0.00	0.00
08/12/1989 12:30	0.09	0.02	0.00
08/12/1989 13:00	0.23	0.55	0.00
08/12/1989 13:30	0.33	0.20	0.00
08/12/1989 14:00	0.01	0.11	0.00

08/12/1989 14:30	0.00	0.73	0.00
08/12/1989 15:00	0.00	0.29	0.00
08/12/1989 15:30	0.00	0.11	0.00
08/12/1989 16:00	0.01	0.07	0.00
08/12/1989 16:30	0.02	0.00	0.00
08/12/1989 17:00	0.02	0.00	0.00
08/12/1989 17:30	0.02	0.00	0.00
08/12/1989 18:00	0.02	0.02	0.00
08/12/1989 18:30	0.07	0.04	0.00
08/12/1989 19:00	0.33	0.07	0.00
08/12/1989 19:30	0.47	0.10	0.00
08/12/1989 20:00	0.29	0.16	0.00
08/12/1989 20:30	0.21	0.13	0.00
08/12/1989 21:00	0.01	0.10	0.00
08/12/1989 21:30	0.00	0.13	0.00
08/12/1989 22:00	0.00	0.15	0.00
08/12/1989 22:30	0.00	0.06	0.00
08/12/1989 23:00	0.07	0.07	0.00
08/12/1989 23:30	0.71	0.21	0.00
09/12/1989 00:00	1.09	1.60	0.00
09/12/1989 00:30	0.82	0.39	0.00
09/12/1989 01:00	0.57	1.11	0.00
09/12/1989 01:30	0.60	0.41	0.00
09/12/1989 02:00	4.91	0.39	0.00
09/12/1989 02:30	3.56	0.42	0.00
09/12/1989 03:00	1.04	5.17	0.00
09/12/1989 03:30	0.50	0.00	0.00
09/12/1989 04:00	0.75	0.26	0.00
09/12/1989 04:30	0.63	0.84	0.00
09/12/1989 05:00	1.01	6.65	0.00
09/12/1989 05:30	0.78	0.00	0.00
09/12/1989 06:00	1.00	0.00	0.00
09/12/1989 06:30	0.82	0.00	0.00
09/12/1989 07:00	0.66	0.00	0.00
09/12/1989 07:30	0.48	0.00	0.00
09/12/1989 08:00	0.18	0.24	0.00
09/12/1989 08:30	0.17	0.28	0.00
09/12/1989 09:00	0.25	0.68	0.00
09/12/1989 09:30	0.23	0.74	0.00
09/12/1989 10:00	0.12	0.13	0.00
09/12/1989 10:30	0.03	0.00	0.00
09/12/1989 11:00	0.01	0.00	0.00
09/12/1989 11:30	0.00	0.00	0.01
09/12/1989 12:00	0.00	0.00	0.00
09/12/1989 12:30	0.00	0.00	0.05
09/12/1989 13:00	0.00	0.00	3.16
09/12/1989 13:30	0.00	0.00	1.18
09/12/1989 14:00	0.01	0.00	0.17
09/12/1989 14:30	0.01	0.00	0.04
09/12/1989 15:00	0.01	0.61	0.00
09/12/1989 15:30	0.01	0.60	0.13

09/12/1989 16:00	0.21	0.34	0.04
09/12/1989 16:30	0.42	0.30	0.00
09/12/1989 17:00	0.47	0.40	0.00
09/12/1989 17:30	0.29	0.31	0.00
09/12/1989 18:00	0.54	0.20	0.00
09/12/1989 18:30	0.37	3.25	0.00
09/12/1989 19:00	1.07	0.09	0.00
09/12/1989 19:30	0.03	0.03	0.15
09/12/1989 20:00	0.03	0.13	0.44
09/12/1989 20:30	0.19	0.31	0.43
09/12/1989 21:00	0.07	0.41	0.89
09/12/1989 21:30	0.03	0.18	1.03
09/12/1989 22:00	0.03	0.09	1.83
09/12/1989 22:30	0.04	0.14	0.00
09/12/1989 23:00	0.10	0.10	0.00
09/12/1989 23:30	0.27	0.02	0.00
10/12/1989 00:00	0.15	0.00	0.00
10/12/1989 00:30	0.07	0.00	0.00
10/12/1989 01:00	0.02	0.00	0.00
10/12/1989 01:30	0.04	0.00	0.00
10/12/1989 02:00	0.07	0.00	0.00
10/12/1989 02:30	0.29	0.05	0.00
10/12/1989 03:00	0.00	0.21	0.01
10/12/1989 03:30	0.00	0.21	0.02
10/12/1989 04:00	0.00	0.14	0.02
10/12/1989 04:30	0.00	0.08	0.00
10/12/1989 05:00	0.00	0.10	0.00
10/12/1989 05:30	0.00	0.12	0.00
10/12/1989 06:00	0.00	0.10	0.00
10/12/1989 06:30	0.00	0.12	0.00
10/12/1989 07:00	0.00	0.10	0.00
10/12/1989 07:30	0.00	0.12	0.00
10/12/1989 08:00	0.00	0.31	0.00
10/12/1989 08:30	0.00	0.15	0.00
10/12/1989 09:00	0.00	0.02	0.00
10/12/1989 09:30	0.00	0.00	0.00
10/12/1989 10:00	0.00	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	31.98	34.19	19.39

A.1.2 ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 6 – 7 ΑΠΡΙΛΙΟΥ 1991

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ / ΩΡΑ	ΜΕΓΑΛΗ ΚΕΡΑΣΙΑ	ΔΡΑΚΟΤΡΥΠΑ
06/04/1991 12:00	0.00	0.00
06/04/1991 12:30	0.00	0.00
06/04/1991 13:00	0.00	0.00
06/04/1991 13:30	0.93	0.84
06/04/1991 14:00	2.07	1.13
06/04/1991 14:30	0.90	3.89
06/04/1991 15:00	3.42	4.55
06/04/1991 15:30	0.73	2.39
06/04/1991 16:00	0.72	2.61
06/04/1991 16:30	0.61	4.03
06/04/1991 17:00	5.54	3.41
06/04/1991 17:30	1.73	3.01
06/04/1991 18:00	0.46	2.42
06/04/1991 18:30	0.54	4.21
06/04/1991 19:00	0.53	1.68
06/04/1991 19:30	2.11	3.99
06/04/1991 20:00	7.21	2.49
06/04/1991 20:30	0.82	1.79
06/04/1991 21:00	9.31	1.45
06/04/1991 21:30	0.67	2.12
06/04/1991 22:00	0.89	5.44
06/04/1991 22:30	1.35	2.21
06/04/1991 23:00	1.73	1.55
06/04/1991 23:30	1.57	0.69
07/04/1991 00:00	4.26	1.55
07/04/1991 00:30	1.55	0.74
07/04/1991 01:00	4.68	0.45
07/04/1991 01:30	0.59	0.76
07/04/1991 02:00	1.21	0.31
07/04/1991 02:30	0.96	1.32
07/04/1991 03:00	2.14	1.17
07/04/1991 03:30	1.54	1.09
07/04/1991 04:00	1.48	0.80
07/04/1991 04:30	0.93	0.67
07/04/1991 05:00	0.20	0.99
07/04/1991 05:30	0.00	1.76
07/04/1991 06:00	0.00	0.61
07/04/1991 06:30	0.05	0.19
07/04/1991 07:00	0.16	0.77
07/04/1991 07:30	0.27	0.45
07/04/1991 08:00	0.29	0.97
07/04/1991 08:30	0.24	0.08
07/04/1991 09:00	0.14	0.14
07/04/1991 09:30	0.01	1.88
07/04/1991 10:00	0.00	0.50
07/04/1991 10:30	0.00	0.78
07/04/1991 11:00	0.00	0.34

07/04/1991 11:30	0.00	0.71
07/04/1991 12:00	0.00	0.37
07/04/1991 12:30	0.00	2.97
07/04/1991 13:00	0.00	0.54
07/04/1991 13:30	0.00	1.57
07/04/1991 14:00	0.00	0.22
07/04/1991 14:30	0.00	0.13
07/04/1991 15:00	0.00	0.11
07/04/1991 15:30	0.00	0.00
07/04/1991 16:00	0.00	0.00
07/04/1991 16:30	0.00	0.00
07/04/1991 17:00	0.00	0.00
07/04/1991 17:30	0.00	0.00
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	64.50	80.84

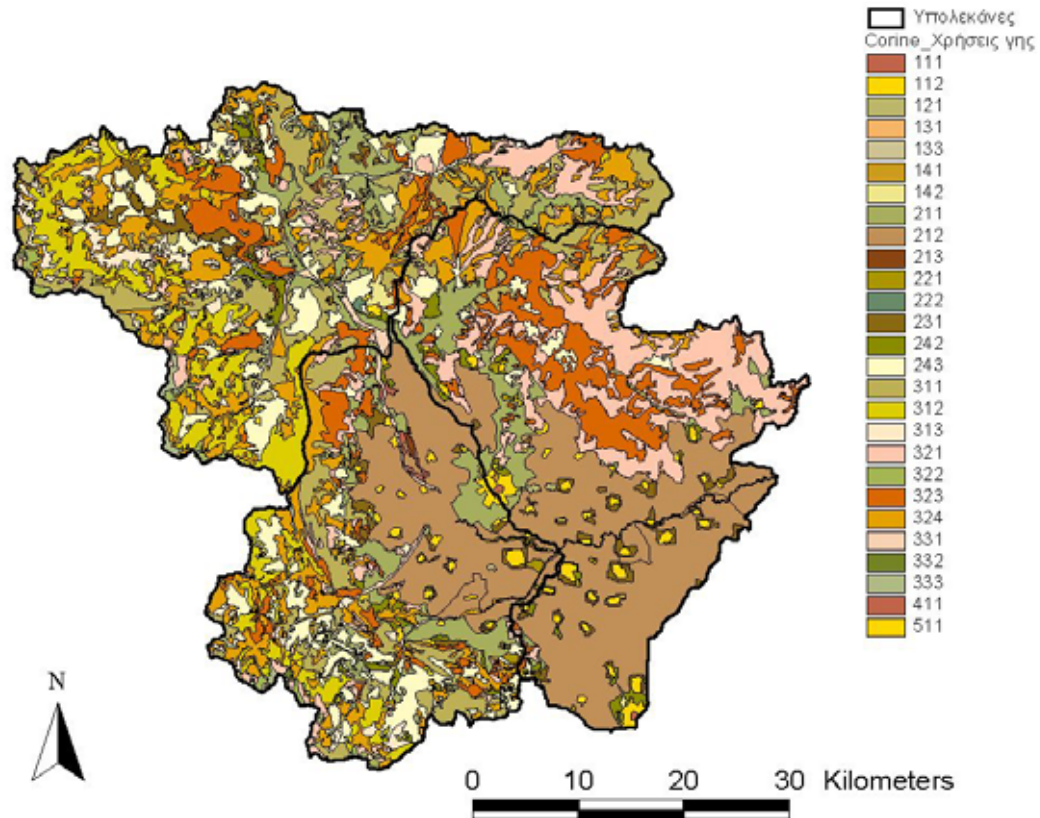
A.1.3 ΕΠΕΙΣΟΔΙΟ 9 – 11 ΜΑΪΟΥ 1991

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ / ΩΡΑ	ΜΕΓΑΛΗ ΚΕΡΑΣΙΑ	ΔΡΑΚΟΤΡΥΠΑ
09/05/1991 18:00	0.00	0.00
09/05/1991 18:30	0.00	0.00
09/05/1991 19:00	0.00	0.00
09/05/1991 19:30	0.00	0.72
09/05/1991 20:00	0.00	0.51
09/05/1991 20:30	0.00	1.57
09/05/1991 21:00	0.00	1.14
09/05/1991 21:30	0.00	0.81
09/05/1991 22:00	0.00	0.23
09/05/1991 22:30	0.00	0.25
09/05/1991 23:00	0.00	0.18
09/05/1991 23:30	0.46	0.70
10/05/1991 00:00	1.96	0.12
10/05/1991 00:30	1.49	0.24
10/05/1991 01:00	0.86	0.40
10/05/1991 01:30	0.60	0.32
10/05/1991 02:00	0.21	0.19
10/05/1991 02:30	0.35	0.04
10/05/1991 03:00	0.45	0.01
10/05/1991 03:30	0.18	0.00
10/05/1991 04:00	0.00	0.00
10/05/1991 04:30	0.00	0.00
10/05/1991 05:00	0.00	0.00
10/05/1991 05:30	0.00	0.00
10/05/1991 06:00	0.00	0.00
10/05/1991 06:30	0.00	0.00
10/05/1991 07:00	0.00	0.00
10/05/1991 07:30	0.00	0.00
10/05/1991 08:00	0.00	0.00
10/05/1991 08:30	0.00	0.00
10/05/1991 09:00	0.00	0.00
10/05/1991 09:30	0.00	0.00
10/05/1991 10:00	0.00	0.00
10/05/1991 10:30	0.00	0.00
10/05/1991 11:00	0.00	0.00
10/05/1991 11:30	0.00	0.00
10/05/1991 12:00	0.00	0.00
10/05/1991 12:30	0.00	0.00
10/05/1991 13:00	0.00	0.00
10/05/1991 13:30	0.00	0.00
10/05/1991 14:00	0.00	0.00
10/05/1991 14:30	0.00	0.00
10/05/1991 15:00	0.00	0.00
10/05/1991 15:30	0.00	0.00
10/05/1991 16:00	0.00	0.00
10/05/1991 16:30	0.00	4.23
10/05/1991 17:00	0.00	1.85

10/05/1991 17:30	0.00	0.97
10/05/1991 18:00	0.00	0.65
10/05/1991 18:30	0.00	2.45
10/05/1991 19:00	0.00	2.76
10/05/1991 19:30	0.71	2.98
10/05/1991 20:00	1.16	2.34
10/05/1991 20:30	0.64	2.87
10/05/1991 21:00	0.20	3.64
10/05/1991 21:30	0.86	4.45
10/05/1991 22:00	1.25	3.43
10/05/1991 22:30	0.06	2.34
10/05/1991 23:00	0.25	2.39
10/05/1991 23:30	0.17	5.67
11/05/1991 00:00	0.05	3.86
11/05/1991 00:30	0.87	1.34
11/05/1991 01:00	5.01	0.78
11/05/1991 01:30	1.16	0.34
11/05/1991 02:00	0.29	0.64
11/05/1991 02:30	0.83	1.54
11/05/1991 03:00	2.01	0.87
11/05/1991 03:30	3.19	7.46
11/05/1991 04:00	0.00	5.07
11/05/1991 04:30	0.00	0.32
11/05/1991 05:00	0.00	0.10
11/05/1991 05:30	0.00	1.12
11/05/1991 06:00	0.00	0.49
11/05/1991 06:30	0.00	0.08
11/05/1991 07:00	0.00	0.03
11/05/1991 07:30	0.00	0.09
11/05/1991 08:00	0.00	0.06
ΣΥΝΟΛΙΚΑ	25.27	74.02

A.2 ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ (CURVE NUMBER)

A.2.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΧΡΗΣΕΩΝ ΓΗΣ



A.2.2 ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΡΙΘΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΧΡΗΣΗ ΓΗΣ

ΚΩΔΙΚΟΣ	Περιγραφή	A	B	C	D
111	Συνεχής αστική οικοδόμηση	77	85	91	92
112	Διακεκομμένη αστική οικοδόμηση	57	72	81	86
121	Βιομηχανικές ή εμπορικές ζώνες	89	92	94	95
131	Χώροι εξορύξεως ορυκτών	77	86	91	94
133	Χώροι οικοδόμησης	57	72	81	86
141	Περιοχές αστικού πράσινου	49	69	79	84
142	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	39	61	74	80
211	Μη αρδεύσιμη αρόσιμη γη	65	76	84	88
212	Μόνιμα αρδευόμενη γη	72	81	88	91

213	Ορυζώνες	63	75	83	87
221	Αμπελώνες	35	58	71	78
222	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	32	58	72	79
231	Λιβάδια	49	69	79	84
242	Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	62	71	78	81
243	Γη που καλύπτεται κυρίως από τη γεωργία με σημαντικές εκτάσεις φυσικής βλάστησης	68	79	86	89
311	Δάσος πλατυφύλλων	30	55	70	77
312	Δάσος κωνοφόρων	30	55	70	77
313	Μικτό δάσος	32	58	72	79
321	Φυσικοί βοσκότοποι	39	61	74	80
322	Θάμνοι και χερσότοποι	30	48	65	73
323	Σκληροφυλλική βλάστηση	30	48	65	73
324	Μεταβατικές δασώδεις θαμνώδεις εκτάσεις	43	65	76	82
331	Παραλίες αμμόλοφοι αμμουδιές	55	72	81	86
332	Απογυμνωμένοι βράχοι	90	94	96	98
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	68	79	86	89
411	Βάλτοι στην ενδοχώρα	98	98	98	98
511	Ροές υδάτων	97	97	97	97

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Γκούμας Κ., 2008.
«Οι αρδεύσεις στη θεσσαλική πεδιάδα: επιπτώσεις στα επιφανειακά και υπόγεια νερά» - Ημερίδα «Υδατικοί πόροι και γεωργία», Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση.
2. Ε.Μ.Π. , Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. , Αθήνα, 2008.
«Μελέτη για το εθνικό πρόγραμμα διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων».
3. Κουτσογιάννης Δ., Αθήνα, 2001.
«Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εκτροπής του Αχελώου».
4. Μαμάσης Ν., Κουτσογιάννης Δ., Αθήνα, 1996.
«Υδροσκόπιο – Προκαταρκτική εφαρμογή στο υδατικό διαμέρισμα Θεσσαλίας».
5. Μαρίνος Π., Αθήνα 1995.
«Συνολική μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εκτροπής του Αχελώου».
6. Μιμίκου Μ., Μπαλτάς Ε.Α., Αθήνα, 2002.
«Τεχνική Υδρολογία»
Ε.Μ.Π. - Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
7. Μιμίκου Μ., Αθήνα, 1994.
«Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»
Ε.Μ.Π. - Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
8. Ντοανίδης Λ., Αθήνα, 2007.
«Συγκριτική εφαρμογή του υδρολογικού ομοιώματος HEC – HMS σε ενιαία και ημικατανεμημένη μορφή, στην υδρολογική λεκάνη του ποταμού Καλαμά».
Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία.
9. Beven K.J., 1989.
«Changing ideas in hydrology – the case of physically based models».

10. Bedient P.B., Huber W.C., 1992.
«Hydrology and floodplain analysis»
11. Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W., 1988.
«Applied hydrology».
12. Cunderlik J., Simonovic S., 2004.
«Calibration, verification and sensitivity analysis of the HEC – HMS hydrologic model» - University of Western Ontario.
13. Knebl M.R., Yang Z.L., Hutchison K., Maidment D.R., 2005.
«Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin, summer 2002 storm event».
14. Madsen H., 2000.
«Automatic calibration of a conceptual rainfall – runoff model using multiple objectives».
15. Refsgaard J.C., 1997.
«Parameterization, calibration and validation of distributed hydrological models».

Διευθύνσεις στο διαδίκτυο:

1. <http://www.usgs.gov>
Γεωλογική Υπηρεσία Η.Π.Α.
2. <http://www.statistics.gr>
Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδας (Ε.Σ.Υ.Ε.)
3. <http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr/el/index.html>
Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (Ε.Τ.Υ.Μ.Π.)

4. <http://titan.chi.civil.ntua.gr/website/greece/viewer.html>
Υδροπληροφορική - Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφορίας (HydroloGIS)
5. <http://www.itia.ntua.gr>
6. <http://www.hec.usace.army.mil>
Hydrologic Engineering Center – US Army Corps of Engineers
Hydrologic Modeling System (HMS)
«User’s Manual», 2008
«Technical Reference Manual», 2000
«Application Guide», 2008
7. <http://www.esri.com>
8. <http://www.thessalia.gov.gr/>