



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΝΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ**  
**ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΟΔΗΓΙΑ 2007 / 60 / ΕΕ.**  
**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ**

Σωτηροπούλου Κωνσταντίνα

ΔΠΜΣ  
«Επιστήμη  
&  
Τεχνολογία  
Υδατικών  
Πόρων»

Επιβλέπων Καθηγητής: Μαμάσης Νικόλαος, Λέκτορας ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2012



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	I
EXTENDED ABSTRACT .....	III
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Βασικές Έννοιες – Κοινοτική Οδηγία 2007 / 60 για τις Πλημμύρες.....	1
1.2 Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας.....	2
1.3 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.....	4
1.4 Διάθρωση εργασίας .....	4
2 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	7
2.1 Γενικά .....	7
2.2 Μορφολογία της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού .....	8
2.3 Γεωλογία και υδρογεωλογία της λεκάνης του ποταμού Σπερχειού .....	10
2.3.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά .....	10
2.3.2 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.....	12
2.4 Υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης .....	15
2.5 Χρήσεις γης της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού .....	16
3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΟΤΑΜΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ .....	19
3.1 Εισαγωγή .....	19
3.2 Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης .....	19
3.2.1 Προεπεξεργασία αρχικών δεδομένων .....	20
3.2.2 Δημιουργία αρχείων εισόδου για την υδρολογική προσομοίωση .....	25
3.3 Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής .....	28
3.3.1 Απώλειες Βροχής.....	29
3.3.2 Άμεση απορροή .....	35
3.3.3 Βασική απορροή.....	41
3.3.4 Διόδευση πλημμύρας.....	41
3.3.5 Μετεωρολογικό μοντέλο .....	42
3.4 Αρχείο προσομοίωσης.....	46

3.5 Εκτέλεση υπολογισμών υδρολογικής προσομοίωσης - Αποτελέσματα .	47
3.6 Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου .....	49
3.6.1 Μείωση του συντελεστή CN κατά 15% .....	50
3.6.2 Μείωση του συντελεστή CN κατά 30% .....	51
3.6.3 Μείωση του συντελεστή CN κατά 30% και αλλαγή προτύπου διόδευσης – Χρήση μέθοδος Muskingum. ....	52
<b>4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ</b> .....	<b>56</b>
4.1 Εισαγωγή .....	56
4.2 Δημιουργία γεωμετρικού αρχείου .....	56
4.2.1 Δημιουργία TIN .....	57
4.2.2 Δημιουργία θεματικών επιπέδων .....	58
4.2.3 Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου .....	65
4.3 Υδραυλική προσομοίωση του ποταμού Σπερχείου .....	65
4.3.1 Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων .....	66
4.3.2 Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων .....	68
4.3.3 Εκτέλεση υδρολογικών υπολογισμών .....	69
4.3.4 Επισκόπηση αποτελεσμάτων .....	75
<b>5 ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ</b> .....	<b>79</b>
5.1 Εισαγωγή .....	79
5.2 Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο HEC-GeoRAS .....	79
5.3 Σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών .....	82
5.4 Σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης .....	85
<b>6 ΧΑΡΤΕΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ</b> .....	<b>91</b>
6.1 Εισαγωγή .....	91
6.2 Η έννοια της επικινδυνότητας και η χαρτογράφησης .....	92
6.3 Χαρτογράφηση των στοιχείων ενεργητικού υψηλού κινδύνου (χάρτες τρωτότητας) .....	94
6.3.1 Περιεχόμενα χαρτών επικινδυνότητας .....	94
6.3.2 Χρήση χαρτών .....	97
6.3.3 Κλίμακα σχεδιασμού των εκτιμήσεων .....	97
6.4 Άλλοι τύποι πληροφοριών .....	98

6.4.1 Αντιπλημμυρικά έργα.....	98
6.4.2 Καταστροφές από πλημμύρες .....	99
6.5 Σύνθεση χαρτών κινδύνου πλημμύρας στην περιοχή μελέτης .....	101
<b>7 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>106</b>
7.1 Υδρολογική προσομοίωση .....	106
7.2 Υδραυλική προσομοίωση.....	107
7.3 Σύνθεση χαρτών πλημμύρας .....	108
7.4 Χάρτες κινδύνου πλημμύρας.....	108
7.5 Αξιολόγηση λογισμικού .....	109
7.6 Προτάσεις μετεξέλιξης της παρούσας εργασίας .....	109
<b>BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>111</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>115</b>

### **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΧΑΡΤΩΝ**

<b>Χάρτης 2.1:</b> Γεωγραφική θέση της λεκάνης του Σπερχειού και τοπογραφία της περιοχής αυτής. (ΠΗΓΗ: ΙΓΜΕ, 2010) .....	7
<b>Χάρτης 2.2:</b> Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης του Σπερχειού (ΠΗΓΗ: ΙΓΜΕ, 2010).....	12
<b>Χάρτης 2.3:</b> Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής Σπερχειού. (ΠΗΓΗ: Κουτσογιάννης, 2003) .....	14
<b>Χάρτης 2.4:</b> Απεικόνιση των κλίσεων στην περιοχή μελέτης.....	16
<b>Χάρτης 2.5:</b> Χάρτης χρήσεων γης της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού. ....	17
<b>Χάρτης 2.6:</b> Χάρτης ειδών καλλιέργειας σε τμήμα της λεκάνης του Σπερχειού. (ΠΗΓΗ: Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε.).....	18
<b>Χάρτης 3.1:</b> Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού.....	20
<b>Χάρτης 4.1:</b> Απεικόνιση του TIN της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού.....	58
<b>Χάρτης 4.2:</b> Απεικόνιση των κύριων κλάδων για επιλέχθηκαν για την υδραυλική προσομοίωση .....	60
<b>Χάρτης 4.3:</b> Διατομές κατά μήκος Σπερχειού και η φωτογραφική τους απεικόνιση (ΠΗΓΗ: <a href="http://www.ktimatologio.gr">www.ktimatologio.gr</a> ) .....	63
<b>Χάρτης 4.4:</b> Χρήσεις γης. ....	64

<b>Χάρτης 5.1:</b> Απεικόνιση του πολυγώνου που σχηματίζεται από τις διατομές του ποταμού και επισήμανση του τμήματος που δεν λαμβάνεται υπόψιν κατά την υδραυλική προσομοίωση. ....	81
<b>Χάρτη 5.2:</b> Απεικόνιση του πολυγώνου που σχηματίζεται από τις διατομές του ποταμού στο HEC-GeoRAS. ....	82
<b>Χάρτης 5.3:</b> Πιεζομετρικός χάρτης για την ανάντη λεκάνη του ποταμού Σπερχειού και για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς $T=10$ έτη. ....	83
<b>Χάρτης 5.4:</b> Πιεζομετρικός χάρτης για την ανάντη λεκάνη του ποταμού Σπερχειού και για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς $T=100$ έτη. ....	83
<b>Χάρτης 5.5:</b> Πιεζομετρικός χάρτης για την ανάντη λεκάνη του ποταμού Σπερχειού και για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς $T=500$ έτη. ....	84
<b>Χάρτης 5.6:</b> Πιεζομετρικός χάρτης για την ανάν λεκάνη του ποταμού Σπερχειού και για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς $T=500$ έτη. ....	84
<b>Χάρτης 5.7:</b> Χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη. ....	86
<b>Χάρτης 5.8:</b> Χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη. ....	86
<b>Χάρτης 5.9:</b> Χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη. ....	87
<b>Χάρτης 5.10:</b> Χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη. ....	87
<b>Χάρτης 5.11:</b> Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας για περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη. ....	89
<b>Χάρτης 5.12:</b> Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη. ....	89
<b>Χάρτης 5.13:</b> Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας για περίοδο επαναφοράς $T=500$ έτη. ....	90
<b>Χάρτης 5.14:</b> Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη. ....	90
<b>Χάρτης 6.1:</b> Χάρτες κινδύνου πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς $T=10$ έτη. ....	102

<b>Χάρτης 6.2:</b> Χάρτες κινδύνου πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς T=100 έτη. ...	103
<b>Χάρτης 6.3:</b> Χάρτες κινδύνου πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς T=500 έτη. ...	103
<b>Χάρτης 6.4:</b> Χάρτες κινδύνου πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη. ..	104

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

<b>Σχήμα 1.1:</b> Τυποποίηση μεθοδολογίας για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας με τη βοήθεια των προγραμμάτων HEC-HMS και HEC-RAS. (ΠΗΓΗ: Γκιόκας, 2009) .....	3
<b>Σχήμα 2.1:</b> Προοπτική απεικόνιση της λεκάνης απορροής του ποταμού Σπερχειού. (ΠΗΓΗ: Ψωμάδης, 2010) .....	9
<b>Σχήμα 2.2:</b> Υπολεκάνες ανάντη περιοχής Σπερχειού και εκτάσεις αυτών. ....	15
<b>Σχήμα 3.1:</b> Εντολές του μενού Terrain Preprocessing της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS. ....	20
<b>Σχήμα 3.2:</b> Κωδικοποίηση της διεύθυνσης ροής της ESRI. (ΠΗΓΗ DeMers, 2000). ..	22
<b>Σχήμα 3.3:</b> (α) Πίνακας διεύθυνσης ροής, (β) Πίνακας συγκεντρωτικής ροής (ΠΗΓΗ: Chang, 2002).....	22
<b>Σχήμα 3.4:</b> Υδρογραφικό δίκτυο της ανάντη περιοχής του Σπερχειού. ....	23
<b>Σχήμα 3.5:</b> Διαχωρισμός του υδατορεύματος σε τμήματα. ....	23
<b>Σχήμα 3.6:</b> Διαχωρισμός σε υπολεκάνες βάσει του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής. ....	24
<b>Σχήμα 3.7:</b> Απεικόνιση των υπολεκανών και του υδατορεύματος σε διανυσματική μορφή (vector) .....	24
<b>Σχήμα 3.8:</b> Μήτρες δεδομένων για την δημιουργία αρχείων εισόδου του HEC-HMS. ....	25
<b>Σχήμα 3.9:</b> (α) μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής, (β) μήκος διαδρομής από κέντρο βάρους έως την έξοδο. ....	26
<b>Σχήμα 3.10:</b> (α) Ονομασία παραποτάμων και (β) Ονομασία λεκανών.....	27
<b>Σχήμα 3.11:</b> Δημιουργία υποβάθρου HMS.....	28
<b>Σχήμα 3.12:</b> Μοντέλο λεκάνης απορροής στο HEC-HMS.....	29
<b>Σχήμα 3.13:</b> Παράθυρο εισαγωγής στοιχείων για τις απώλειες της βροχόπτωσης στο HEC-HMS.....	35

<b>Σχήμα 3.14:</b> Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα σύμφωνα με το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας (ΠΗΓΗ: Κουτσογιάννης, 2003) .....	38
<b>Σχήμα 3.15:</b> Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W120. ....	39
<b>Σχήμα 3.16:</b> Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W120 διαιρούμενο κατά 10.....	40
<b>Σχήμα 3.17:</b> (α) Επιλογή μεθόδου μοναδιαίου υδρογραφήματος, (β) αντιστοιχία μοναδιαίου υδρογραφήματος σε κάθε υπολεκάνη.....	41
<b>Σχήμα 3.18:</b> Σημειακές όμβριες καμπύλες για την περιοχή της Λαμίας. (ΠΗΓΗ: Κουτσογιάννης, 2003) .....	43
<b>Σχήμα 3.19:</b> Υετόγραμμα σχεδιασμού βροχής 48 h για περίοδο επαναφοράς $T=100$ με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ. ....	44
<b>Σχήμα 3.20:</b> Αθροιστικό υετόγραμμα σχεδιασμού βροχής 48 h για περίοδο επαναφοράς $T=100$ .....	45
<b>Σχήμα 3.21:</b> Διαδικασία εισαγωγής επεισοδίου βροχής στο HEC-HMS. ....	46
<b>Σχήμα 3.22:</b> Παράθυρο εισαγωγής χρονικών ορίων της υδρολογικής προσομοίωσης. ....	47
<b>Σχήμα 3.23:</b> Πλημμυρογράφημα σχεδιασμού ανάντη λεκάνης Σπερχειού για περίοδο επαναφοράς (α) $T=10$ έτη, (β) $T=100$ έτη, (γ) $T=500$ έτη και (δ) $T=1000$ έτη αντίστοιχα .....	48
<b>Σχήμα 3.24:</b> Το πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για την υπολεκάνη W200 με το υετόγραμμα σχεδιασμού με τις απώλειες για περίοδο επαναφοράς $T=500$ έτη. ....	49
<b>Σχήμα 3.24:</b> Εισαγωγή παραμέτρων της μεθόδου διόδευσης Muskingum στο HEC-HMS.....	54
<b>Σχήμα 3.25:</b> Πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για την ανάντη λεκάνη του Σπερχειού για περιόδους επαναφοράς $T=100$ , $T=500$ και $T=1000$ έτη αντίστοιχα .....	55
<b>Σχήμα 4.1:</b> Διάγραμμα της διαδικασίας του HEC-GeoRAS .....	57
<b>Σχήμα 4.2:</b> Τμήμα ποταμού Σπερχειού με σχεδιασμένες εκατέρωθεν τις όχθες αυτού. ....	61
<b>Σχήμα 4.3:</b> Απεικόνιση των γεωμετρικών στοιχείων κάθε διατομής όπως αυτά παρουσιάζονται στο HEC-RAS. ....	66
<b>Σχήμα 4.4:</b> Παράθυρα εισαγωγής υδρολογικών δεδομένων του HEC-RAS .....	68
<b>Σχήμα 4.5:</b> Παράμετροι της υδραυλικής προσομοίωσης στο HEC-RAS.....	70



<b>Σχήμα 4.6:</b> Απεικόνιση μεγεθών της εξίσωσης ενέργειας. (ΠΗΓΗ: Παπανικολάου, 2007) .....	71
<b>Σχήμα 4.7:</b> Μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή μεταφορικότητας στο HEC-RAS. ....	72
<b>Σχήμα 4.8:</b> Επιλογές μεθόδου για τον υπολογισμό απωλειών λόγω τριβής στο HEC-RAS.....	73
<b>Σχήμα 4.9:</b> Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας διατομής . (ΠΗΓΗ Γκιόκας, 2009) .....	74
<b>Σχήμα 4.10:</b> (α) Διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 100 ετών (β) διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 500 ετών και (γ) διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 1000 ετών. ....	75
<b>Σχήμα 4.11:</b> Δισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς T=100 έτη. ....	76
<b>Σχήμα 4.12:</b> Δισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς T=500 έτη. ....	76
<b>Σχήμα 4.13:</b> Δισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη. ....	76
<b>Σχήμα 4.14:</b> Μεταβολή στάθμης στη διατομή 10 του ποταμού 1, (β) Μεταβολή στάθμης στη διατομή 104 του ποταμού 2 και (γ) Μεταβολή στάθμης στη διατομή 4 του ποταμού .....	77
<b>Σχήμα 5.1:</b> Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων της υδραυλικής προσομοίωσης στο HEC-GeoRAS για την δημιουργία χαρτών πλημμύρας. ....	80

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των τμημάτων του υδατορεύματος και των υπολεκανών.....	27
Πίνακας 3.2: Κατηγορίες εδαφών ανάλογα με την διαπερατότητα τους όπως ορίζονται από την SCS (Κουτσογιάννης Δ. και Ξανθόπουλος Θ., 1999). ....	32
Πίνακας 3.3: τύποι προηγηθέντων συνθηκών υγρασίας κατά την μέθοδο SCS (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). ....	32
Πίνακας 3.4: Πίνακας τιμών CN για συνθήκες υγρασίας τύπου II. ....	33

Πίνακας 3.5: Τιμή CN που αντιστοιχεί σε κάθε υπολεκάνη της περιοχής μελέτης. ....	34
Πίνακας 3.6: Τιμές χρόνου υστέρησης (lag time) για κάθε τμήμα του υδατορεύματος. .....	42
Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης της ανάντη Σπερχειού με τη βοήθεια το HEC-HMS .....	48
Πίνακας 3.8: Τιμές παραμέτρου CN για κάθε υπολεκάνη μειωμένες κατά 15%. .....	50
Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης στην έξοδο της λεκάνης με μείωση του CN κατά 15%. .....	50
Πίνακας 3.10: Τιμές παραμέτρου CN για κάθε υπολεκάνη μειωμένες κατά 30%. .....	51
Πίνακας 3.11: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης στην έξοδο της λεκάνης με μείωση του CN κατά 15%. .....	52
Πίνακας 3.12: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης με μείωση των τιμών του CN κατά 30% και χρήση της μεθόδου διόδευσης Muskingum. ....	54
Πίνακας 4.1: Εκτίμηση του συντελεστή n του Manning σύμφωνα με τα πολύγωνα χρήσεων γης (Γκιόκας, 2009). .....	64
Πίνακας 4.2: Εκταση πλημμυρικής κατάκλυσης από πλημμύρες με περίοδο επαναφοράς 10, 100, 500 και 1000 έτη. ....	77
Πίνακας 6.1: Είδη καλλιέργειας και οι εκτάσεις αυτών που πλημμύρισαν από πλημμύρες με περίοδο επαναφοράς $T=10$ , $T=100$ , $T=500$ και $T=1000$ έτη. ....	105



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύσσεται η διαδικασία της υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής και του ποταμού αντίστοιχα, με σκοπό την σύνθεση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και πλημμυρικού κινδύνου.

Η επίτευξη αυτού του στόχου κατέστη εφικτή με την χρήση του λογισμικού HEC-HMS για την υδρολογική προσομοίωση και HEC-RAS για την υδραυλική προσομοίωση. Για την προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων υπό μορφή χαρτών, τα προγράμματα αυτά συνδέονται με το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS, με την χρήση των αντίστοιχων εργαλείοιθκών HEC-GeoHMS και HEC-GeoRAS.

Η διαδικασία, που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, περιγράφεται συνοπτικά με τα εξής βήματα:

- Συλλογή και επεξεργασία αρχικών δεδομένων. Ως αρχικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ο γεωλογικός χάρτης, ο χάρτης χρήσεων γης, η υδρολογική πληροφορία κλπ.
- Υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής για την εκτίμηση των πλημμύρων σχεδιασμού για τέσσερις διαφορετικές περιόδους επαναφοράς.
- Υδραυλική προσομοίωση του ποταμού για την εκτίμηση των πιεζομετρικών βαθών και της γραμμής ενέργειας.
- Σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών και χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης
- Σύνθεση χαρτών κινδύνου της πλημμύρας σχεδιασμού με χρήση του χάρτη ειδών καλλιέργειας του Οργανισμού Πληρωμών και Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων.

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε, είναι η ανάντη λεκάνη απορροής του ποταμού Σπερχειού με έκταση 1128.7 km<sup>2</sup>. Ως αρχικά δεδομένα για την περιοχή μελέτης, αποκτήθηκαν το ψηφιακό μοντέλο εδάφους με ανάλυση φατνίου 25 x 25 m, ο χάρτης χρήσεων γης, ο γεωλογικός χάρτης και λόγω έλλειψης βρομετρικής πληροφορίας χρησιμοποιήθηκαν οι όμβριες καμπύλες που διατίθενται για την περιοχή.

Με την ολοκλήρωση της προεπεξεργασίας των αρχικών δεδομένων, δημιουργούνται τα αρχεία εισόδου για την υδρολογική προσομοίωση. Το υδρολικό μοντέλο που δημιουργείται αποτελείται από 11 υπολεκάνες και ποταμούς μέχρι 3<sup>ης</sup> τάξης. Η εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου ολοκληρώνεται για τέσσερις περιόδους επαναφοράς (10, 100, 500, 1000) και τα προϊόντα αυτής της διαδικασίας είναι τα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για κάθε υπολεκάνη και οι αντίστοιχοι όγκοι πλημμύρας αυτών.

Εν συνεχεία, εκτελείται η υδραυλική προσομοίωση, στην οποία επιλέγεται ένα τμήμα του ποταμού για περαιτέρω επεξεργασία. Οι υπολογισμοί ολοκληρώνονται για τις ίδιες περιόδους επαναφοράς και σε συνθήκες μόνιμης ροής. Εξαγόμενο αποτέλεσμα της υδραυλικής προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός της πιεζομετρικής επιφάνειας του ποταμού για κάθε περίοδο επαναφοράς.

Για την σύνθεση των πιεζομετρικών χαρτών, αντιπαραβάλλονται η πιεζομετρική επιφάνεια, όπως προέκυψε από την υδραυλική προσομοίωση, με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και υπολογίζονται τα βάθη του νερού. Με τον τρόπο αυτό, ορίζονται και τα ακριβή όρια της κατάκλυσης της πλημμύρας. Η διαδικασία αυτή γίνεται και για τις τέσσερις περιόδους επαναφοράς και συγκρίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Τέλος, εκπονούνται οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας, όπου η σύνθεσή του γίνεται εφικτή με τον συνδυασμό των πολυγώνων της πλημμυρικής κατάκλυσης, που προέκυψαν από το προηγούμενο στάδιο, και τον χάρτη ειδών καλλιέργειας στην περιοχή μελέτης. Υπολογίζονται οι εκτάσεις από κάθε καλλιέργεια που κατακλύζεται από την πλημμύρα και αναφέρονται οι επιπτώσεις του νερού στην κύρια καλλιέργεια που υπάρχει στην περιοχή.

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία δίνει μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και κινδύνου, όπως ορίζεται και από την Οδηγία 2007 / 60 / ΕΕ. Συμβάλλει καίρια στην πρόβλεψη και πρόληψη των δυσμενών επιπτώσεων των πλημμυρών. Με προτεινόμενη μετεξέλιξη της εργασίας στην κατεύθυνση της εκτίμησης του κόστους των ζημιών και ενός διαχειριστικού σχεδίου του κινδύνου πλημμυρών θα αποτελέσει ένα ολοκληρωμένο σχέδιο πρόβλεψης, πρόληψης και αντιμετώπισης των πλημμυρικών φαινομένων και των ζημιών που ενδέχεται να προκαλέσουν.

# EXTENDED ABSTRACT

## 1. Introduction

The Aim of present postgraduate thesis is the hydrologic simulation of basin and the hydraulic simulation of corresponding part of river. The final result of the thesis is the flood hazards maps for this region. The region that was selected for the simulation is the upper basin of Sperhios river.

It is essential for this work to present the process that is followed for the development of flood maps and for this is given a grate consideration in the methodology of simulations. Concisely, the methodology, that is developed, focuses in the following points:

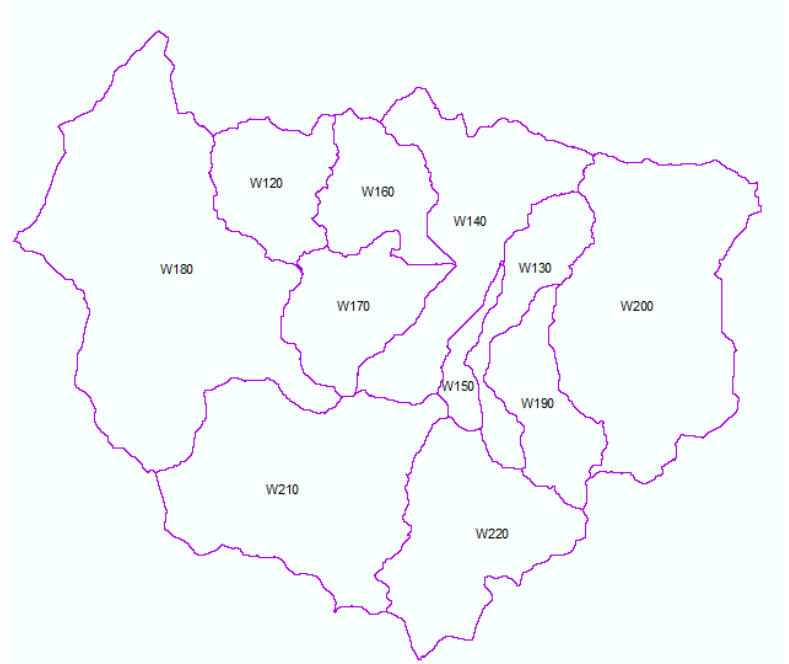
- Process of geographic information in given digital elevation model of study region, in order to delimitation basic geometric and topographic elements of basin and river.
- Calculation of her hydrologic response in the study basin and the export hydrographic network.
- Analysis of river, that has been selected, aiming at the determination of geometric elements of this.
- Hydraulic simulation for the selected river in permanent conditions.
- Use of hydraulic simulation results to compose piezometric and flood hazards maps.

## 2. Case study

Administratively Sperhios basin belongs in the Prefecture Fthiotida where it is also the seat of region of Sterea Hellas and has seat in the city of Lamia.

The region of study is the upper basin of river Sperhios. The extent of basin is 1128.7 km<sup>2</sup> and it is separated in 11 sub basin where the extent of each one appears in following Figure 1.

Subbasin	Area (km <sup>2</sup> )
W120	56.044
W130	45.740
W140	109.766
W150	15.489
W160	52.437
W170	62.852
W180	267.377
W190	51.646
W200	191.402
W210	169.958
W220	106.018



**Figure 1:** Upper Spherhios subbasins and subbasins area.

The hydrographical network of upper basin of Spercheioy is characterized by small number of characteristic streams, low penetrability and high rate of flow . The bigger medium monthly flows are observe from November until April (64.6 – 132.6 hm<sup>3</sup>) while smallest are observe from July until September (9.4 – 15.9 hm<sup>3</sup>).

Main river length was 50802 m, as they were calculated with the help of ArcMap program. In study region is observed intense bas-relief with intense and step slope, that they give in the river a mountainous-ephemeral character, with acute peaks of floods. More concretely, in the bigger amount of upper Spherhios basin the slope is very intense, while in the river main watercourse of river slope are very mild.

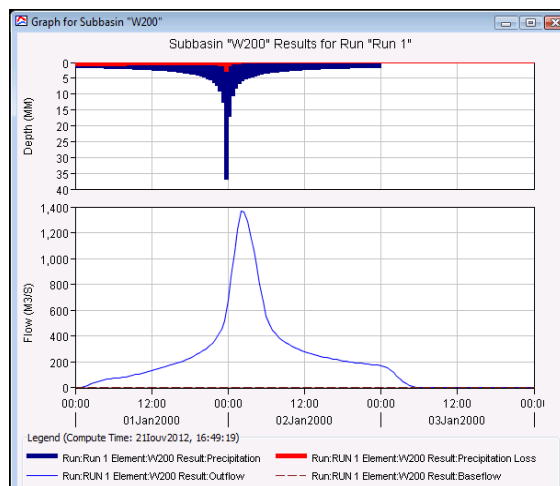
### 3. Hydrologic simulation

The hydrologic simulation constitutes a process of depiction of hydrologic characteristics of a region in order to calculate flood hydrograph of Spherhios basin of for various return of periods. This process is achieved with the use of programs

HEC-GeoHMS and HEC-HMS. More concretely, HEC-GeoHMS constitutes a toolbox inside ArcMap environment. It prepares entry data for the hydrologic simulation. Illustrates the territorial information determining the form of river, the subbasin that takes shape as well as other characteristics of Sperhios basin.

This data are imported in the HEC-HMS in order to modelling the hydrologic characteristics of upper part of Sperhios. The results correspond to floods with return period  $T=10$ ,  $T=100$ ,  $T=500$  and  $T=1000$  years, as it is also fixed by the European Directive on her floods 2007/60.

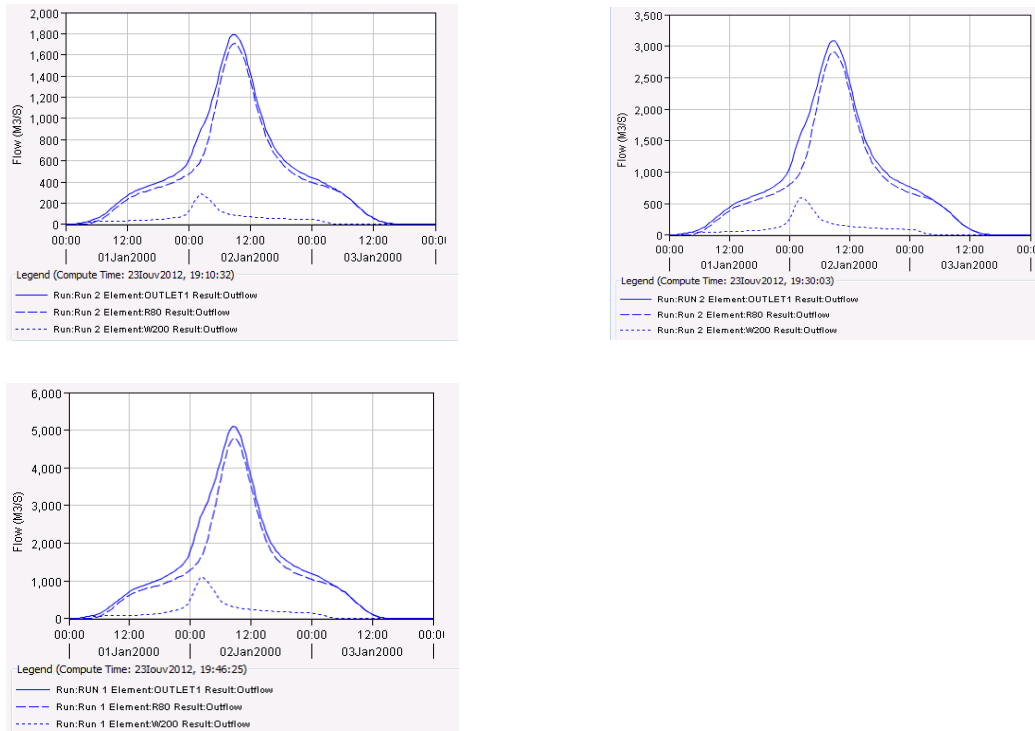
However, is given the possibility of review the results of each hydrologic simulation for subbasin and for each part of river. In Figure 2 it appears indicatively the planning flood hydrograph for the subbasin W200 with the planning storm graph with the losses for return period  $T=500$  years.



**Figure 2:** The planning flood hydrograph for the subbasin W200 with the planning storm graph with the losses for return period  $T=500$  years.

Is observed an over-estimation of calculated flood volumes and peak discharged comparatively with corresponding results of older hydrologic study. It was considered advisable to calibrate the model for the parameters of this. In *Figure 3* appear also final flood hydrograph in the exit of upper basin of Sperhios that is examined in the present Thesis





**Figure 3:** Design Flood hydrograph for the upper Sperhios Basin for retention period  $T=100$ ,  $T=500$  και  $T=1000$  years.

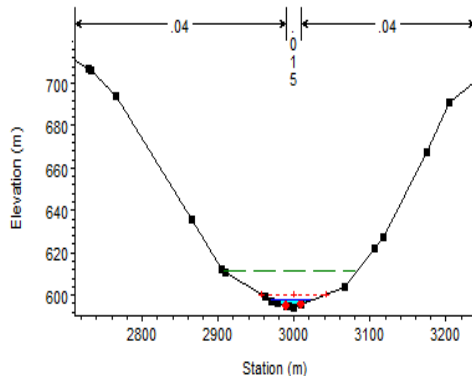
#### 4. Hydraulic simulation

The hydraulic simulation of study area is achieved with the use of HEC-GeoRAS and HEC-RAS programs. Aim of this process is also the calculation of piezometric depths, energy line and floodplain maps.

More analytically, the program HEC-GeoRAS creates the entry files for the simulation. Substantially it prepares the initial data in order to design the suitable geometric model. Digital elevation model of the study area import as initial data.

En continuity, geometric model that emanated from the pretreatment of initial data is imported in the HEC-RAS. With the help of hydrologic file, that resulted from the hydrologic simulation, are calculated the piezometric depths and the lines of energy at river.

Figure 4 illustrates the results of hydraulic simulation of Sperhios river in the cross-section 104 for return period  $T=100$  years.



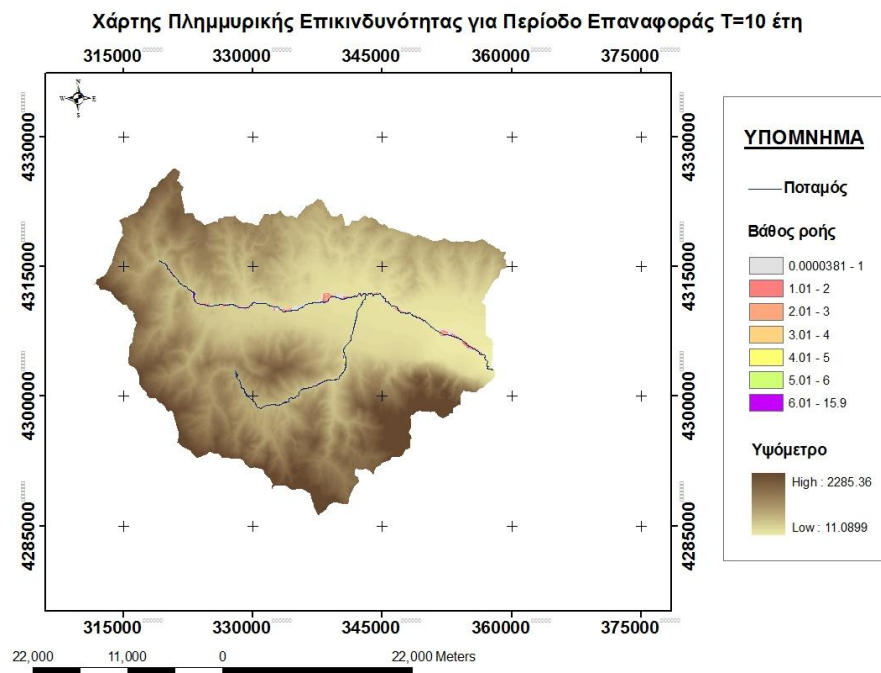
**Figure 4:** Flood at Sperhios cross- section for return period  $T=100$  years

## 5. Flood maps

Final product of hydraulic simulation of Sperhios river constitutes the composition of flood maps. These constitute a graphic depiction of results of design floods, where they provide information about the piezometric surface of river, the limits floodplain and the corresponding water depth.

For flood maps were used HEC-RAS and HEC-GeoRAS. The process that is followed for the export of maps, via the programs, is the following:

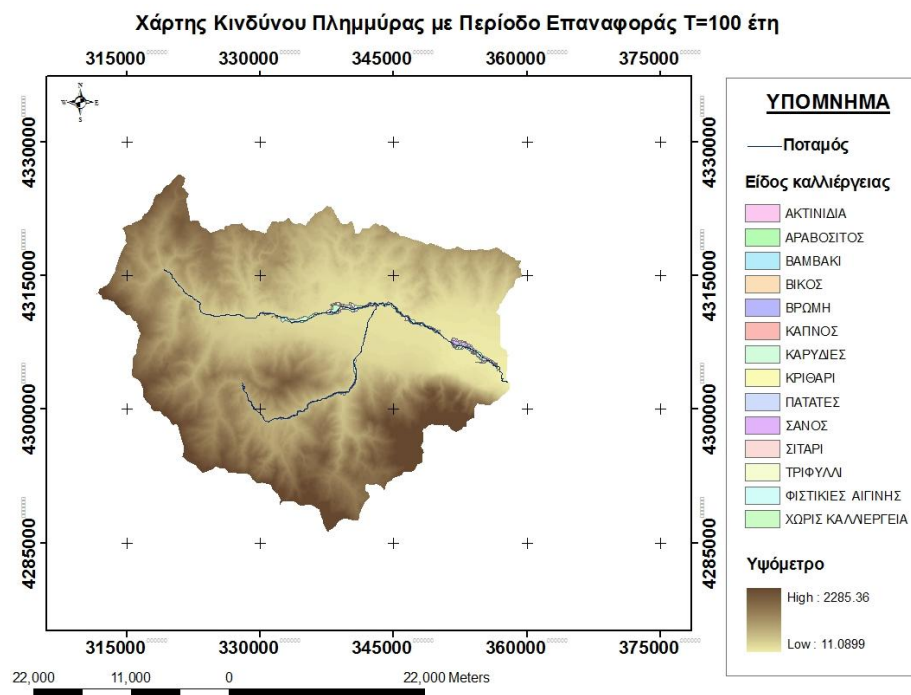
- Export of results in the HEC-RAS
- Composition of piezometric maps
- Composition of floodplain maps



**Map 1 :** Flood hazard maps return period  $T=10$  years

## 6. Flood risk map

The composition of Flood risk map is materialized with the combination of floodplains with land use map. Therefore, is calculated the potential damage from flood. Follow the flood risk map for 100 years flood.



*Map.2: Flood risk map for 100 years flood.*

## 7 Conclusions

The present thesis ends with the following conclusions :

- Hec-hms overestimate the results of hydrologic simulation
- In the hydraulic simulation is required densification of cross-sections of river for the better representation of this and for more precise results.
- Is not observed great deviations in extents between floodplains for the various return periods
- The softwares that were used constitute economically, functional, reliable tools and proposed for the calculation of floodplain and the design of flood map
- A logical recommendation for the thesis' continuation could be the development of a flood management tool

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Βασικές Έννοιες – Κοινοτική Οδηγία 2007 / 60 για τις Πλημμύρες

Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο εξέδωσε στις 23 Οκτωβρίου του 2007, την Οδηγία 2007 / 60 / ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας και τέθηκε σε ισχύ στις 26 Νοεμβρίου του 2007. Σκοπός αυτής, είναι η θέσπιση ενός πλαισίου για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας, με στόχο τη μείωση των δυσμενών συνεπειών της στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική ανάπτυξη (άρθρο 1, 2007 / 60 / ΕΚ).

Η Οδηγία 2007 / 60 / ΕΚ περιλαμβάνει τρία βήματα εφαρμογής. Αρχικά, ορίζει την εφαρμογή της προκαταρκτικής αξιολόγησης των κινδύνων πλημμύρας. Εν συνεχεία, ακολουθεί η κατάρτιση χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας (flood hazard) και χαρτών κινδύνου πλημμύρας (flood risk) και τέλος εκπονούνται τα σχέδια διαχείρισης για κάθε λεκάνη απορροής.

Έτσι, σύμφωνα με το άρθρο 6 της Οδηγίας 2007 / 60 / ΕΚ, τα κράτη μέλη καταρτίζουν, σε επίπεδο περιοχής λεκάνης απορροής ποταμού χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας και χάρτες κινδύνων πλημμύρας, στην πλέον κατάλληλη κλίμακα για τις περιοχές, στις οποίες τα κράτη μέλη συμπεραίνουν ότι υπάρχουν δυνητικοί σοβαροί κίνδυνοι πλημμύρας ή ότι είναι πιθανόν να σημειωθεί πλημμύρα.

Οι χάρτες επικινδυνότητας πλημμύρας καλύπτουν τις γεωγραφικές περιοχές που θα μπορούσαν να πλημμυρήσουν σύμφωνα με τα ακόλουθα σενάρια:

- πλημμύρες χαμηλής πιθανότητας ή σενάρια ακραίων φαινομένων,
- πλημμύρες μέσης πιθανότητας (με πιθανή περίοδο επαναφοράς  $\geq 100$  χρόνια),
- πλημμύρες υψηλής πιθανότητας, ανάλογα με την περίπτωση.

Για κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια παρατίθενται τα ακόλουθα στοιχεία:

- i. η έκταση της πλημμύρας,
- ii. το βάθος νερού ή η στάθμη νερού ανάλογα με την περίπτωση,
- iii. ανάλογα με την περίπτωση, η ταχύτητα ροής ή η σχετική ροή των υδάτων.

Οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας περιγράφουν τις δυνητικές αρνητικές συνέπειες που συνδέονται με τις πλημμύρες υπό τις συνθήκες των προαναφερθέντων σεναρίων και εκφράζονται ως εξής:

- i. ενδεικτικός αριθμός κατοίκων που ενδέχεται να πληγούν,
- ii. τύπος οικονομικής δραστηριότητας στην περιοχή που ενδέχεται να πληγεί,
- iii. εγκαταστάσεις οι οποίες ενδέχεται να προκαλέσουν τυχαία ρύπανση σε περίπτωση πλημμύρας και προστατευόμενες περιοχές, οι οποίες ενδέχεται να πληγούν,
- iv. άλλες πληροφορίες που το κράτος μέλος θεωρεί χρήσιμες, όπως η επισήμανση των περιοχών όπου υπάρχει το ενδεχόμενο πλημμυρών με αυξημένο ποσοστό μεταφερόμενων ιζημάτων και πλημμυρών που παρασύρουν υπολείμματα και πληροφορίες για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές ρύπανσης.

## **1.2 Αντικείμενο της μεταπτυχιακής εργασίας**

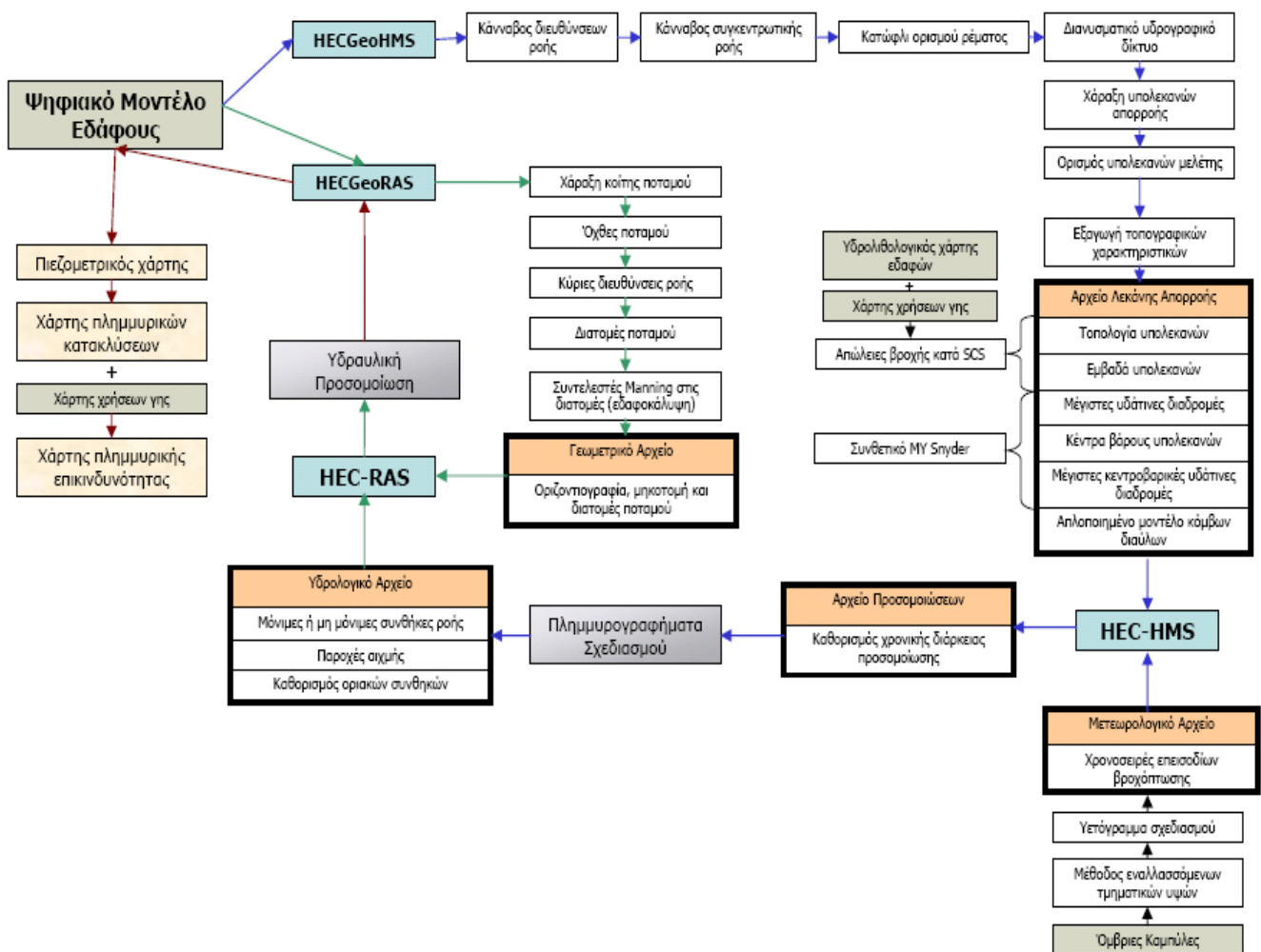
Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής και η υδραυλική προσομοίωση του αντίστοιχου τμήματος του ποταμού με στόχο την εκπόνηση χαρτών επικινδυνότητας και χαρτών κινδύνου πλημμύρας για την περιοχή αυτή. Η περιοχή που επιλέχθηκε για την προσομοίωση είναι η ανάντη λεκάνη του ποταμού Σπερχειού.

Θεωρείται απαραίτητο στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, να καταγραφεί η διαδικασία που ακολουθείται για την εκπόνηση των πλημμυρικών χαρτών και γι αυτό δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην μεθοδολογία των προσομοιώσεων. Συνοπτικά, η μεθοδολογία, που αναπτύσσεται στα υπόλοιπα κεφάλαια, εστιάζει στα παρακάτω σημεία:

- Επεξεργασία γεωγραφικής πληροφορίας σε δεδομένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης, με σκοπό την οριοθέτηση βασικών γεωμετρικών και τοπογραφικών στοιχείων της λεκάνης απορροής και του υδατορεύματος.
- Υπολογισμός της υδρολογικής απόκρισης της υπό μελέτη λεκάνης και την εξαγωγή υδρογραφημάτων.

- Ανάλυση τμήματος του υδατορεύματος, που έχει επιλεγεί, με σκοπό τον προσδιορισμό γεωμετρικών στοιχείων αυτού.
- Υδραυλική μονοδιάστατη προσομοίωση του επιλεχθέντος υδατορεύματος σε συνθήκες μόνιμης ροής.
- Αξιοποίηση των αποτελεσμάτων της υδραυλικής προσομοίωσης για τη δημιουργία πιεζομετρικών χαρτών και χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης.

Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται σχηματικά η παραπάνω διαδικασία. Αναφέρονται τόσο τα δεδομένα που απαιτούνται για την υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση όσο και τα αποτελέσματα αυτών. Επίσης, αναφέρονται και τα αντίστοιχα προγράμματα, όπως αυτά αναφέρονται στην παράγραφο 1.3. Τέλος, προσδιορίζεται ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζονται τα προγράμματα της υδρολογικής και της υδραυλικής προσομοίωσης.



**Σχήμα 1.1:** Τυποποίηση μεθοδολογίας για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας με τη βοήθεια των προγραμμάτων HEC-HMS και HEC-RAS. (ΠΗΓΗ: Γκιόκας, 2009)

### **1.3 Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε**

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι τα προγράμματα HEC-HMS και HEC-RAS, τα οποία έχουν αναπτυχθεί από το σώμα του Αμερικανικού στρατού.

Τα λογισμικά αυτά πακέτα συνεργάζονται με το σύστημα γεωγραφικής υπηρεσίας Arc-Map της ESRI, με σκοπό την προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων.

Τα προγράμματα αυτά αποτελούν μοντέλα υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης αντίστοιχα. Ανήκουν στην κατηγορία των εννοιολογικών μοντέλων, αφού αναπαριστούν τον μηχανισμό της φύσης με απλοποιημένες σχέσεις και παραδοχές. Όσον αφορά την χωρική κλίμακα ανάλυσης, τα μοντέλα αυτά θεωρούνται ημικατανεμημένα, αφού η περιοχή μελέτης εξετάζεται σε υπολεκάνες με διαφορετικές παραμέτρους η κάθε μία. Τέλος, το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS ανήκει στην κατηγορία των διακριτών μοντέλων, αφού περιγράφουν ένα μεμονωμένο γεγονός, όπως είναι το υδρογράφημα ή η αιχμή πλημμύρας, και η αναπαράστασή τους γίνεται μέσω εμπειρικών ή συστημικών προσεγγίσεων (π.χ. ορθολογική μέθοδος, μοναδιαίο υδρογράφημα), παραλείποντας ορισμένες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, όπως είναι η εξατμοδιαπνοή και η διήθηση (Ευστρατιάδης, Ρόζος και Κουκουβίνος, 2009).

Οι εκδόσεις των προγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των προσομοιώσεων και την τελική εκπόνηση των χαρτών επικινδυνότητας και κινδύνου της περιοχής μελέτης είναι το HEC-HMS 3.5 και το HEC-RAS 9.3. Τα προγράμματα αυτά είναι συμβατά με την έκδοση του προγράμματος διαχείρισης συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών ArcGis 9.3 της εταιρείας ESRI.

### **1.4 Διάθρωση εργασίας**

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά της Οδηγίας 2007 / 60 / ΕΕ, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην αναφορά αυτής για τους χάρτες επικινδυνότητας και χάρτες κινδύνου πλημμύρας. Αναφέρεται ο σκοπός της παρούσας εργασίας και τέλος γίνεται αναφορά στα λογισμικά πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του σκοπού αυτού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά της περιοχής μελέτης όσον αφορά τη μορφολογία, τη γεωλογία και το υδρογραφικό δίκτυο αυτής με αντίστοιχη παράθεση χαρτών που αναδεικνύουν το ανάγλυφο, τους γεωλογικούς και υδρογεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής καθώς επίσης και τις χρήσεις γης αυτής.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία της υδρολογικής προσομοίωσης της ανάντη λεκάνη του Σπερχειού. Ξεκινά με την προεπεξεργασία των δεδομένων της υδρολογικής προσομοίωσης και ολοκληρώνεται με την εκτέλεση του μοντέλου και τον υπολογισμό των πλημμυρογραφημάτων της κάθε υπολεκάνης αλλά και της εξόδου του μοντέλου καθώς επίσης και των όγκων της πλημμύρας. Εξετάζονται τέσσερα διαφορετικά σενάρια πλημμύρας που αναφέρονται σε βροχή με περίοδο επαναφοράς  $T=10$ ,  $T=100$ ,  $T=500$  και  $T=100$  έτη. Γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων και πινάκων. Ωστόσο, επειδή τα αποτελέσματα του μοντέλου δεν είναι ικανοποιητικά γίνεται μια βαθμονόμηση του μοντέλου, όπου εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια βαθμονόμησης και επιλέγεται το καλύτερο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύεται βήμα προς βήμα η διαδικασία της υδραυλικής προσομοίωσης τμήματος του αρχικού ποταμού μελέτης. Η υδραυλική προσομοίωση περιλαμβάνει το στάδιο της προεπεξεργασίας των δεδομένων, που αφορούν τη γεωμετρία και γεωλογία της περιοχής και του τμήματος του ποταμού, και την εκτέλεση των υπολογισμών αυτής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, αναφέρεται η διαδικασία εκπόνησης πιεζομετρικών χαρτών και χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας καθώς και η παρουσίαση αυτών. Σχεδιάστηκαν χάρτες για κάθε περίοδο επαναφοράς που εξετάστηκε.

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται μια εκτενής αναφορά στους χάρτες κινδύνου πλημμύρας, σύμφωνα με την Οδηγία 2007 / 60 / ΕΕ. Επίσης, περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται για την εκπόνηση αυτών και γίνεται παράθεση των τελικών χαρτών κινδύνου πλημμύρας. Οι καταστροφές που μπορεί να προκαλέσει η πλημμύρα που εξετάζεται κάθε φορά ποσοτικοποιείται σε έκταση καλλιέργειας που καταστρέφεται. Ωστόσο, γίνεται και μια μικρή αναφορά στην επίπτωση που μπορεί να έχει η πλημμύρα στην κάθε καλλιέργεια.



Τέλος, το έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνει έναν γενικό σχολιασμό των αποτελεσμάτων, την εξαγωγή των συμπερασμάτων από την χρήση των μοντέλων καθώς επίσης και ορισμένες προτάσεις.

## 2 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 2.1 Γενικά

Διοικητικά η λεκάνη Σπερχειού ανήκει στον Νομό Φθιώτιδας όπου είναι και η έδρα της περιφέρειας Στερεάς Ελλάδος και έχει έδρα στην πόλη της Λαμίας.

Η λεκάνη Σπερχειού καταλαμβάνει έκταση περίπου 700 km<sup>2</sup> Εκτείνεται από τον Μαλιακό κόλπο Ανατολικά, μέχρι τις παρυφές του όρους Τυμφρηστός στα Δυτικά. Βόρεια, οριοθετείται από το όρος Όθρυς και νότια από τα όρη Οίτη και Καλλίδρομο, όπως φαίνεται και στο Χάρτη 2.1.



*Χάρτης 2.1: Γεωγραφική θέση της λεκάνης του Σπερχειού και τοπογραφία της περιοχής αυτής. (ΠΗΓΗ: ΙΓΜΕ, 2010)*

Περιμετρικά, οι κύριες πόλεις είναι η Λαμία, Στυλίδα, Μακρακώμη, Σπερχειάδα, Υπάτη, Γοργοπόταμος, Θερμοπύλες και Καμένα Βούρλα, οι οποίες είναι και τα κυριότερα εμπορικά κέντρα της ευρύτερης περιοχής.

Η μορφολογία της λεκάνης είναι επίπεδη έως λοφώδης με υψόμετρα που κυμαίνονται, κύρια από 0 έως 100 m. και περιμετρικά φθάνουν και τα 200 m. Όσον αφορά τα περιθώρια της λεκάνης, στο μεν Βόρειο τμήμα της (όρος Όθρυς) παρατηρούνται υψόμετρα μέχρι 1.200 m με μικρές και ομαλές κλίσεις, ενώ στο Νότιο (όρος Οίτη) παρατηρούνται υψόμετρα μέχρι 2.100 m, με έντονο ανάγλυφο και βαθιές χαραδρώσεις. Οι μικρές και μεγάλες χαραδρώσεις που συναντώνται στην περιοχή και κύρια στα περιθώρια της λεκάνης, έχουν διεύθυνση Β-N και αντίστροφα και τροφοδοτούν τον ποταμό Σπερχειό.

Όλη η περιοχή καλύπτεται από ένα πυκνό δίκτυο επαρχιακών και αγροτικών δρόμων που βοήθησαν στη διεξαγωγή των ερευνητικών εργασιών και στη λεπτομερέστερη διερεύνηση της λεκάνης. Ανατολικά, η περιοχή διασχίζεται σχεδόν εγκάρσια από την παλαιά και νέα εθνική οδό Αθηνών-Θεσσαλονίκης. Βόρεια, διατρέχεται από την οδό Λαμίας-Καρπενησίου. Επίσης, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στο κέντρο περίπου της λεκάνης διέρχεται η σιδηροδρομική γραμμή Αθηνών-Θεσσαλονίκης.

Οι κυριότερες αγροτικές καλλιέργειες που παρατηρούνται στην περιοχή είναι τα δημητριακά, τα καπνά, το βαμβάκι, οι ελιές και τα οπωροφόρα δένδρα. (ΙΓΜΕ, 2010)

## **2.2 Μορφολογία της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ποταμού**

Η λεκάνη απορροής του Σπερχειού ποταμού περικλείεται ουσιαστικά από δύο σειρές βουνών. Οι ψηλότερες κορυφογραμμές βρίσκονται κατά μήκος του νότιου και δυτικού - βορειοδυτικού ορίου, των Βαρδουσίων (2.437 m), της Οίτης (2.152 m) και του Τυμφρηστού (2.316 m). Στο νοτιοανατολικό άκρο του υδροκρίτη βρίσκεται το όρος Καλλίδρομο (1.372 m), ενώ ο υδροκρίτης του βόρειου και βορειοανατολικού άκρου σχηματίζεται από αντερείσματα του όρους Όθρυς (1.727 m) (Κακαβάς, 1984).

Οι κύριοι ορογραφικοί άξονες του Τυμφρηστού, της Οίτης και του Καλλίδρομου έχουν διεύθυνση περίπου ΒΒΔ-NNA. Αυτός ο προσανατολισμός των ορογραφικών αξόνων, ασκεί αρκετά μεγάλη επίδραση στην κατανομή των

ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και των υπολοίπων κλιματικών στοιχείων. Το μορφολογικό ανάγλυφο είναι ιδιαίτερα απότομο προς τα νότια, όπου σε μια μικρή σχετικά απόσταση, παρουσιάζει υψομετρική διαφορά ακόμα και 300 m, ενώ βόρεια παρουσιάζεται πιο ήπιο και χαμηλό. Η συνολική επιφάνεια της λεκάνης απορροής του Σπερχειού ανέρχεται σε 1.828 km<sup>2</sup>, με μέσο υψόμετρο στα 626 m (Σχήμα 2.1).



*Σχήμα 2.1: Προοπτική απεικόνιση της λεκάνης απορροής του ποταμού Σπερχειού. (ΠΗΓΗ: Ψωμιάδης, 2010)*

Τα όρια της λεκάνης, είναι σαφώς προσδιορισμένα, στο ορεινό τμήμα του υδροκρίτη προς τις γειτονικές λεκάνες που είναι, προς τα βόρεια οι λεκάνες των νοτίων παραποτάμων του Πηνειού ποταμού της Θεσσαλίας, προς τα νότια η λεκάνη του Μόρνου και του Βοιωτικού Κηφισού και προς τα δυτικά οι υπολεκάνες που συμβάλουν στον Αχελώο ποταμό. Προς τα ανατολικά η λεκάνη του Σπερχειού είναι ανοικτή προς τη θάλασσα και ορίζεται από τον Μαλιακό κόλπο και τις μικρές υπολεκάνες βόρεια και νότια του Μαλιακού κόλπου. Η τεκτονική τάφρος του Σπερχειού είναι ένα βύθισμα με διεύθυνση Δ-Α και με μεταβλητό πλάτος από 3 έως 12 km, σε μια απόσταση 50 km περίπου μέχρι τον Μαλιακό κόλπο. Αυτή η τάφρος είναι γεμάτη με ιζήματα Ολοκαινικής και Πλειστοκαινικής ηλικίας και τέμνει τον φλύσχη της Πίνδου, τους γεωλογικούς σχηματισμούς της δυτικής Όθρυος και τον φλύσχη και τους ασβεστόλιθους της ζώνης Παρνασσού-Γκιώνας (Ψωμιάδης, 2010).

### Σπερχειός ποταμός

Ο ποταμός Σπερχειός πηγάζει από τον Τυμφρηστό, ρέει από τα δυτικά προς τα ανατολικά, ενώ εκρέουν σε αυτόν περισσότεροι από 60 ποταμοί και χείμαρροι, παροδικής ή μόνιμης ροής, με τους περισσότερους, να εκβάλουν στον Σπερχειό σχηματίζοντας δεξιές γωνίες. Το συνολικό υδρογραφικό δίκτυο είναι δενδριτικού

τύπου, αλλά αναπτύσσεται περισσότερο κατά τον επιμήκη άξονά του. Ο κύριος άξονάς του Σπερχειού αρχίζει στην θέση Άγιος Γεώργιος, έχει μήκος 85.2 km και παρουσιάζει μία μέση ετήσια παροχή νερού της τάξης των 62 m<sup>3</sup>/s, κυμαινόμενη από 10-20 m<sup>3</sup>/s τον Αύγουστο, έως 110 m<sup>3</sup>/s τον Ιανουάριο. Η κοίτη του Σπερχειού τροφοδοτείται από χείμαρρους μόνιμης και περιοδικής ροής, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι ο Ρουστιανίτης, ο Ίναχος (Βίστριτσα), ο Γοργοπόταμος, ο Ασωπός και ο Ξηριάς Λαμίας. Κατά τα δύο τρίτα του μήκους της, η κοιλάδα του εμφανίζει έντονες κλίσεις που δίνουν στον ποταμό χαρακτήρα ορεινό – χειμαρρικό, με οξείες αιχμές πλημμύρων και πολύ έντονη στερεοπαροχή. Αντίθετα, κατά το τελευταίο τρίτο της διαδρομής του, ο Σπερχειός μετατρέπεται σταδιακά σε πεδινό ποταμό και διασχίζει χαμηλές περιοχές. Η κεντρική κοίτη του ποταμού Σπερχειού παρουσιάζει μέση κλίση που κυμαίνεται από 0.5% στην περιοχή του δέλτα έως και 13% στο ορεινό τμήμα της λεκάνης απορροής (Ψωμιάδης, 2010).

### **2.3 Γεωλογία και υδρογεωλογία της λεκάνης του ποταμού Σπερχειού**

Στην υποενότητα που ακολουθεί αναφέρονται τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης του Σπερχειού. Στα γεωλογικά χαρακτηριστικά περιγράφονται τα είδη των πετρωμάτων που καλύπτουν την περιοχή ενώ στα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά αναλύεται η διαπερατότητα των πετρωμάτων αυτών και χωρίζονται σε κατηγορίες (περατά, ημιπερατά και αδιαπέρατα).

#### **2.3.1 Γεωλογικά χαρακτηριστικά**

Η λεκάνη Σπερχειού είναι αρκετά εκτεταμένη. Αρχίζει από το Μαλιακό κόλπο και εκτείνεται μέχρι τις παρυφές του όρους Τυμφρηστός, έχει πληρωθεί από ιζήματα του Νεογενούς και Τεταρτογενούς. Γεωτεκτονικά, στην ευρύτερη περιοχή παρατηρούνται τέσσερις ενότητες του Αλπικού ορογενετικού κύκλου. Βόρεια και Νότια-Νοτιοανατολικά παρατηρείται η Υποπελαγονική ενότητα, στο κέντρο και Νότια η ενότητα Παρνασσού-Γκιώνας και Δυτικά η ενότητα της Πίνδου και η Υπερπινδική. Στο Νότιο-Νοτιδυτικό τμήμα της περιοχής οι παραπάνω γεωτεκτονικές ενότητες βρίσκονται σε τεκτονική επαφή είτε με επώθηση είτε με εφίπλευση.

Αφαιρώντας τα μεταλλικά ιζήματα, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης το καταλαμβάνουν οι σχηματισμοί της Υποπελαγονικής ενότητας οι οποίοι αποτελούν και το υπόβαθρο αυτής. Δυτικά, παρατηρείται σαν υπόβαθρο της λεκάνης, σε μια στενή λωρίδα, η ενότητα Παρνασσού - Γκιώνας και δυτικότερα, σε ένα πολύ μικρό τμήμα της, η ενότητα της Πίνδου.

Η δημιουργία της λεκάνης Σπερχειού είναι αποτέλεσμα, μεταγενέστερων του Αλπικού ορογενετικού κύκλου, τεκτονικών κινήσεων, κυρίως ρηγμάτων διεύθυνσης Βορρά-Νότου και Ανατολής-Δύσης. Στη συνέχεια πληρώθηκε με κλαστικά ιζήματα που προήλθαν από τη διάβρωση των σχηματισμών του υποβάθρου.

### **Τεταρτογενείς σχηματισμοί**

Ολόκληρη η λεκάνη Σπερχειού καλύπτεται από Τεταρτογενείς σχηματισμούς, οι οποίοι συνίστανται από ποτάμιες και χερσαίες αποθέσεις όπως αργίλους, άμμους, κροκαλοπαγή, κώνους κορημάτων, χειμαρρώδεις αποθέσεις και λατυποπαγή που η σύσταση και η εξάπλωσή τους είναι συνάρτηση των παρακείμενων ή υποκείμενων παλαιότερων σχηματισμών.

Στις περιοχές που παρατηρούνται θερμές εκδηλώσεις, παρατηρείται απόθεση ασβεστολίθων θερμών πηγών (τραβερίνης). Επίσης, κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς, εκδηλώθηκε ηφαιστειακή δραστηριότητα στην Ανατολική περιοχή του βυθίσματος της λεκάνης, στα μικρά νησιά των Λιχάδων. Τα ηφαιστειακά πετρώματα είναι βασαλτικής έως δακιτικής σύστασης και είναι αποτέλεσμα μεγάλων και βαθιών ρηγμάτων. Εκδηλώνονται κύρια στη διασταύρωση των δύο διευθύνσεων ρηγμάτων Α-Δ και ΒΑ-ΝΔ.

### **Νεογενείς σχηματισμοί**

Τα Νεογενή ιζήματα, ηπειρωτικά, λιμναία ή θαλάσσια, που εμφανίζονται στο Βορειοανατολικό και Νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης του Σπερχειού και κυρίως στα περιθώρια, αποτελούνται από συνεκτική μάργα, ιλυολίθους, αργίλους, κροκαλοπαγή και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους με μικρές λιγνιτικές παρεμβολές.

Τους σχηματισμούς αυτούς ο P. Celet (1962), με βάση τα απολιθώματα που βρήκε, τους τοποθετεί στο Ανώτερο Μειόκαινο-Πλειόκαινο.

## Σχηματισμοί υποβάθρου

Οι σχηματισμοί του υποβάθρου αποτελούνται κύρια από σχιστόλιθους, ασβεστόλιθους, δολομίτες, οφιολίθους, σχιστοκερατολίθους και φλύσχη. Στο γεωλογικό Χάρτη 2.2 φαίνονται οι σχηματισμοί και η εξάπλωσή τους (ΙΓΜΕ, 2010).



### ΥΠΟΜΝΗΜΑ

#### ΜΕΤΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

- Αλλοίβια, ρητίδια, κίτρινα κορημίτινη, χερσαίες αποθέσεις (Πλαϊστοκαιίνου), τορκικά υλικά εκ θερμών πηγών
- Τραβερτίνης εκ θερμών πηγών
- Νεογενές αββαίρειο
- Μυλοσσοίκοι σχηματισμοί

#### ΑΛΠΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

- ΣΣΝΗ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΠΙΝΔΟΥ**
- Φλύσχη

#### ΥΠΕΡΠΙΝΔΙΚΗ ΣΕΡΑ

- Αν Κρητιδική ασβεστόλιθοι, πελαγικοί και μαργαικοί με κλαστικούς ασβεστόλιθους και κροκαλοπαγή

#### ΣΤΡΩΜΑΤΑ ΑΡΧΑΙΟΥ

- Ασβεστόλιθοι
- Ψαμίτες

#### ΣΣΝΗ ΠΑΡΝΑΣΣΟΥ - ΓΚΙΟΝΑΣ

- Φλύσχη
- Ασβεστόλιθοι Ημικαίνου
- Υποκείμενος ασβεστόλιθος τρίτου βωζτικού οριζοντα
- Ενδιάμεσος ασβεστόλιθος τρίτου και δεύτερου βωζτικού οριζοντα
- Υποκείμενος ασβεστόλιθος δεύτερου βωζτικού οριζοντα

#### ΣΣΝΗ ΥΠΟΠΕΛΑΓΟΝΙΚΗ

- Φλύσχη
- Αν Κρητιδική Ασβεστόλιθοι
- Κοινομένος επίκλιση
- Ενδιάμεσος ασβεστόλιθος δεύτερου και πρώτου βωζτικού οριζοντα
- Πρώτος βωζτικός οριζοντα
- Υποκείμενος ασβεστόλιθος πρώτου βωζτικού οριζοντα
- Σχιστοκερατολιθική διάπλιση
- Δολομίτης και ασβεστόλιθος Τρακιό-Ιουραϊκό

#### ΗΦΑΙΣΤΕΙΑΚΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

- Ηφαιστειακά Τεταρτογενούς

- Ισούσις
- Εφίπτιση
- Επίσθση
- Ρήγμα
- Πλευνό ρήγμα
- Κλίση γεωλογικών σχηματισμών
- Υδρογραφικό δίκτυο
- Οδικό δίκτυο
- Εθνική οδός
- Κόρια οδός
- Δευτερεύουσα οδός
- Χαμηλόβαθμοι
- Διεφοροποιημένο δίκτυο
- Πρωτεύουσα ή κορυφή
- Πόλις / χωριά

Χάρτης 2.2: Γεωλογικός χάρτης της λεκάνης του Σπερχειού (ΠΗΓΗ: ΙΓΜΕ, 2010)

### 2.3.2 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά

Τα πετρώματα του υποβάθρου της λεκάνης Σπερχειού συνίστανται από σχιστόλιθους, ασβεστόλιθους, δολομίτες, οφιολίθους - σχιστοκερατολίθους και από φλύσχη. Η υδρογεωλογική συμπεριφορά των παραπάνω σχηματισμών είναι συνάρτηση κυρίως του βαθμού της τεκτονικής καταπόνησής τους και του πετρογραφικού χαρακτήρα των σχηματισμών.

Τα πετρώματα του υποβάθρου διαχωρίζονται υδρογεωλογικά σε περατούς σχηματισμούς (ασβεστόλιθοι-δολομίτες), σε ημιπερατούς (ιζήματα φλύσχη) και αδιαπέρατους σχηματισμούς (σχιστόλιθοι, οφιόλιθοι, σχιστοκερατόλιθοι).

Οι περατοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή είναι Μεσοζωικοί ασβεστόλιθοι, δολομίτες του Κρητιδικού και Ιουρασικού της Υποπελαγονικής ενότητας και της ενότητας Παρνασσού - Γκιώνας. Οι αντίστοιχοί των Δυτικών ενότητων, Πίνδου και Υπερπινδικής εκτιμάται ότι βρίσκονται σε μεγάλο βάθος κάτω από τον φλύσχη.

Οι ασβεστόλιθοι του Αν. Κρητιδικού της Υποπελαγονικής και της ενότητας Παρνασσού Γκιώνας, εξαιτίας των έντονων και μεγάλου ανοίγματος διακλάσεων και των συχνών διελεύσεων νερού, πολλές φορές διαμόρφωσαν καρστικά έγκοιλα σε διάφορες θέσεις. Στα πρηνή των ασβεστόλιθων αυτών παρατηρούνται πολλές κρύες και ζεστές πηγές με μεγάλη παροχή νερού.

Οι ασβεστόλιθοι και δολομίτες του Τριαδικού - Ιουρασικού, της Υποπελαγονικής ζώνης, εμφανίζονται στα Ανατολικά περιθώρια και αποτελούν το υπόβαθρο των οφιολίθων σχιστοκερατολίθων. Η καρστικοποίηση σ' αυτούς είναι τόσο έντονη ώστε η παροχή των θερμών πηγών που παρατηρούνται σ' αυτούς να είναι πολύ μεγάλη.

Οι Ιουρασικοί ασβεστόλιθοι της ενότητας Παρνασσού - Γκιώνας εμφανίζονται στα ΝΔ περιθώρια της λεκάνης και εξ' αιτίας της έντονης τεκτονικής καταπόνησης και των συχνών διακλάσεων, διαμορφώθηκαν σε ένα σημαντικό υδροπερατό σχηματισμό. Στα πρηνή των σχηματισμών αυτών παρατηρούνται πολλές και σημαντικές πηγές.

Οι ημιπερατοί σχηματισμοί συνίστανται από τα ιζήματα του φλύσχη και καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση Νότια-Νοτιοδυτικά και κυρίως Δυτικά. Το πάχος των ιζημάτων του φλύσχη εμφανίζεται σχετικά μικρό. Στην Υποπελαγονική ενότητα είναι περίπου 100 m και στην Παρνασσού - Γκιώνας 300 m. Σε αντίθεση, στις ενότητες Πίνδου και Υπερπινδική ξεπερνά τα 4.000 m. Η υδροπερατότητα των σχηματισμών αυτών είναι περιορισμένη και παρατηρείται σε εξαλωιωμένες ζώνες ή περιοχές με έντονη τεκτονική καταπόνηση. Οι πηγές που εμφανίζονται στους σχηματισμούς του φλύσχη είναι αποτέλεσμα των ρηγμάτων που παρατηρούνται.



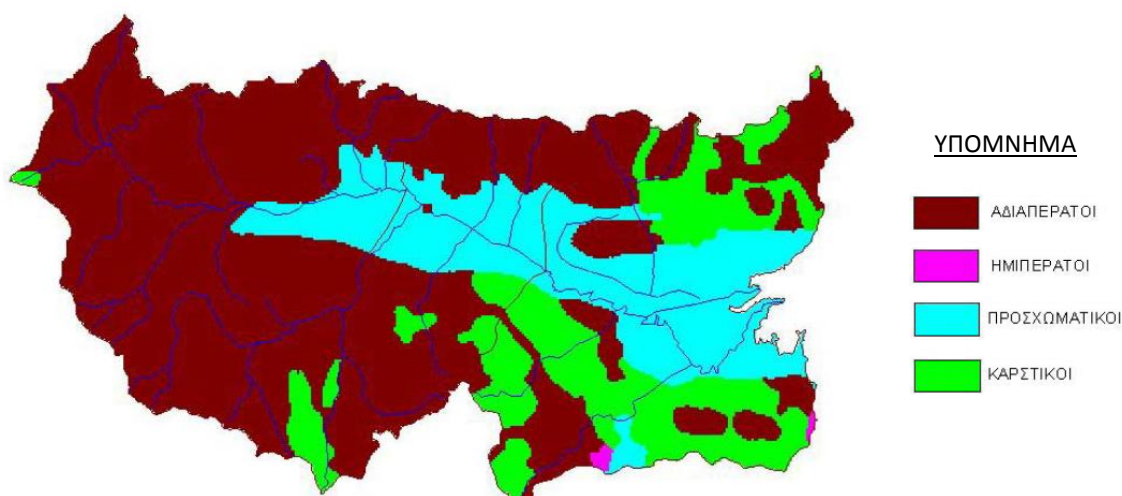
Μεγάλη έκταση καταλαμβάνουν οι οφιόλιθοι - σχιστοκερατόλιθοι, στα περιθώρια και στο υπόβαθρο της λεκάνης, οι οποίοι σχηματίζουν ένα στεγανό κάλυμμα των υποκείμενων ασβεστόλιθων-δολομιτών της Υποπελαγονικής ενότητας. Το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφανειακής απορροής στη λεκάνη, οφείλεται στην μεγάλη έκταση που καταλαμβάνουν οι ημιπερατοί (φλύσχης) και μη περατοί (οφιόλιθοι - σχιστοκερατόλιθοι) σχηματισμοί.

Τα ιζήματα που πλήρωσαν τη λεκάνη συνίστανται κυρίως από άμμους, αργίλους, ιλύες, κροκαλοπαγή, κώνους κορημάτων κ.ά. Η σύστασή τους είναι συνάρτηση των σχηματισμών του υποβάθρου που υπόκειται ή βρίσκεται παραπλεύρως και το μέγεθος των κόκκων της απόστασης μεταφοράς.

Ο Σπερχειός ποταμός που πηγάζει από τις Δυτικές ζώνες, διατρέχει όλη τη λεκάνη και εκβάλλει στο Μαλιακό κόλπο. Αποτέλεσε ένα σημαντικό παράγοντα στη μεταφορά και απόθεση κλαστικών υλικών. Οι εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες επηρεάζουν άμεσα στην απόθεση των κλαστικών ιζημάτων. Παρατηρείται ότι τα πλέον αδρομερή υλικά αποτίθενται στο Δυτικό τμήμα της λεκάνης και τα λεπτομερέστερα στο Ανατολικό.

Το πάχος των ιζημάτων είναι μικρότερο στο Δυτικό τμήμα, στις παρυφές των βουνών και στις περιοχές που παρατηρούνται υβώματα ή εξάρματα και μεγαλύτερο στο Ανατολικό τμήμα της λεκάνης.

Επομένως, οι σχηματισμοί χωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες που είναι: αδιαπέρατοι, ημιπερατοί, προσχωματικοί και καρστικοί. Στον Χάρτη 2.3 φαίνεται η έκταση των σχηματισμών αυτών.

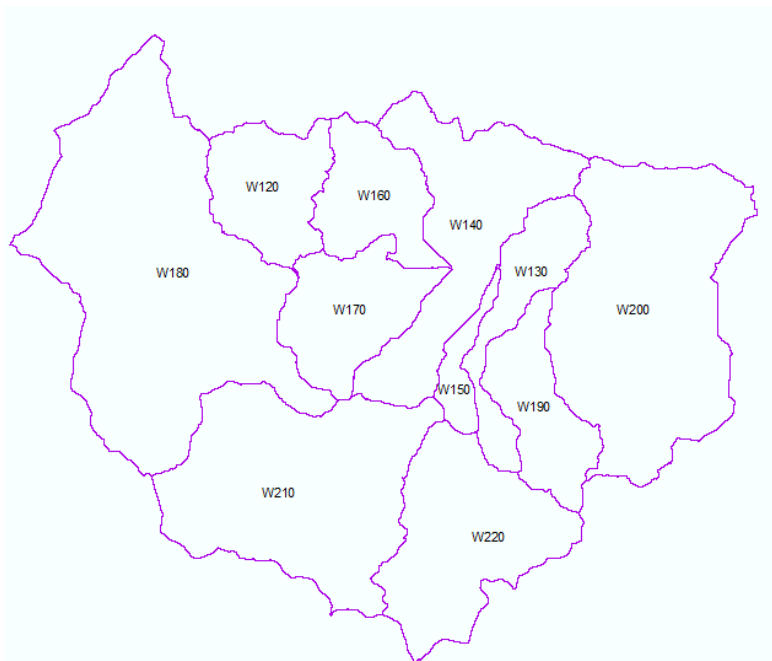


Χάρτης 2.2: Υδρογεωλογικοί σχηματισμοί λεκάνης απορροής Σπερχειού. (ΠΗΓΗ: Κουτσογιάννης, 2003)

## 2.4 Υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελετης που επιλέχθηκε για περαιτέρω επεξεργασία είναι η ανάντη λεκάνη του ποταμού Σπερχειού. Η έκταση της λεκάνης αντιστοιχει σε 1128.7 km<sup>2</sup> και χωρίζεται σε 11 υπολεκάνες όπου η εκτασή της κάθεμίας φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.2.

ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ	ΕΚΤΑΣΗ (km <sup>2</sup> )
W120	56.044
W130	45.740
W140	109.766
W150	15.489
W160	52.437
W170	62.852
W180	267.377
W190	51.646
W200	191.402
W210	169.958
W220	106.018



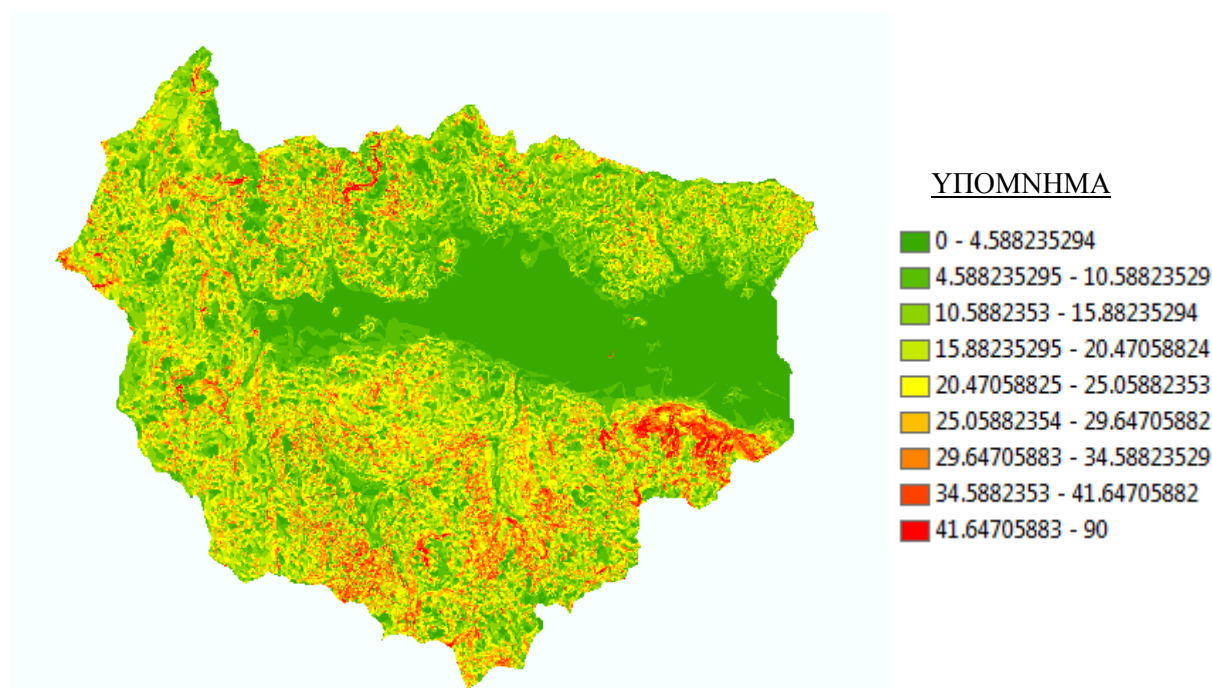
Σχήμα 2.2: Υπολεκάνες ανάντη περιοχής Σπερχειού και εκτάσεις αυτών.

Η μορφή του υδρογραφικού δικτύου έχει άμεση σχέση με την υδρογεωλογική δομή, την τεκτονική, τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων το βροχομετρικό ύψος, την εποχιακή κατανομή των βροχοπτώσεων, το βαθμό δασοκάλυψης κλπ. Έτσι, το υδρογραφικό δίκτυο της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού χαρακτηρίζεται από μικρό αριθμό χαρακτηριστικών ρεμάτων, χαμηλή διαπερατότητα και υψηλό ποσοστό απορροής (Κακαβάς, 1984). Οι μεγαλύτερες μέσες μηνιαίες απορροές εμφανίζονται από τον Νοέμβριο έως τον Απρίλιο (64.6 – 132.6 hm<sup>3</sup>) ενώ οι μικρότερες εμφανίζονται από τον Ιούλιο έως το Σεπτέμβριο (9.4 – 15.9 hm<sup>3</sup>) (Ψωμιάδης, 2010).

Η κύρια μισγάγγεια του ποταμού έχει μήκος 50802 m, όπως υπολογίσθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος ArcMap. Κατά μήκος του ποταμού παρατηρείται

έντονος μαιανδρισμός τόσο σε τμήματα κατά μήκος της κύριας μισγάγγειας όσο και σε παραπόταμο αυτής.

Στην περιοχή παρατηρείται έντονο ανάγλυφο με έντονες κλίσεις, που δίνουν στον ποταμό χαρακτήρα ορεινό-χειμαρρικό, με οξείες αιχμές πλημμυρών και έντονη στερεοπαροχή. Πιο συγκεκριμένα, στο μεγαλύτερο τμήμα της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού οι κλίσεις είναι πολύ έντονες, ενώ στο τμήμα της κύριας κοίτης του ποταμού οι κλίσεις είναι πολύ ήπιες έως και σχεδόν επίπεδες. Στον χάρτη 2.4 φαίνονται αναλυτικά οι κλίσεις στην υπό εξέταση λεκάνη του Σπερχειού.



*Χάρτης 2.4: Απεικόνιση των κλίσεων στην περιοχή μελέτης*

## 2.5 Χρήσεις γης της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού

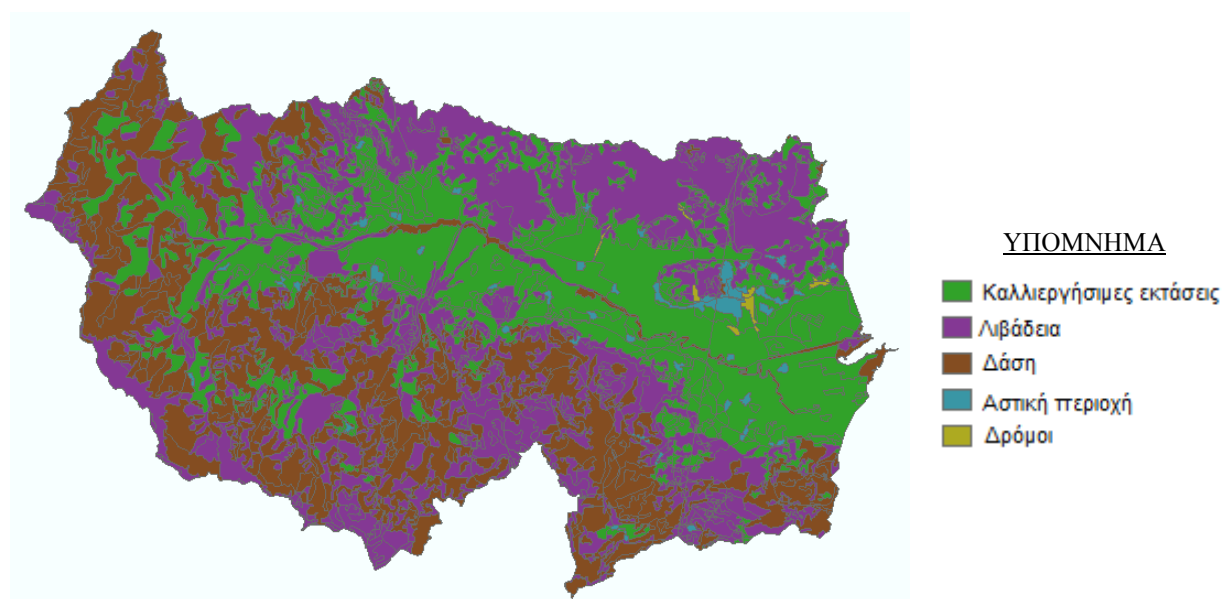
Ο χάρτης χρήσεων γης αναφέρονται στο είδος κάλυψης του εδάφους, είτε αυτό είναι φυσικό ή ανθρωπογενές. Το είδος της κάλυψης της γης έχει ιδιαίτερη σημασία για την υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής. Αποτελεί ουσιαστικά μια παράμετρο για τον υπολογισμό του συντελεστή απωλειών της βροχόπτωσης.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, γίνεται ομαδοποίηση των χρήσεων γης σε πέντε μεγάλες κατηγορίες οι οποίες αναφέρονται σε:

### 1. Καλλιεργήσιμες εκτάσεις

2. Λιβάδια
3. Δάση
4. Αστικές περιοχές
5. Δρόμοι

Η ανάντη λεκάνη του Σπερχειού καλύπτεται κυρίως από καλλιεργήσιμες εκτάσεις αλλά και δάση και λιβάδια. Δεν παρατηρείται έντονη αστική ανάπτυξη στην περιοχή και αντίστοιχα δεν υπάρχουν μεγάλοι οδικοί άξονες στην περιοχή. Τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν από τον παρακάτω Χάρτη 2.5 χρήσεων γης.



*Χάρτης 2.5: Χάρτης χρήσεων γης της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού.*

Εκτός από τον χάρτη χρήσεων γης, απαραίτητος είναι και ο χάρτης που απεικονίζει το είδος των καλλιεργειών που καλύπτουν την περιοχή μελέτης. Με τη βοήθεια αυτών μπορεί να εκτιμηθεί η ζημιά που θα προκαλέσει μια πιθανή πλημμύρα στην περιοχή. Παρακάτω, εμφανίζεται ένας χάρτης ειδών καλλιέργειας, ο οποίος δημιουργήθηκε από τον Οργανισμό Πληρωμών και Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων (Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε.). Στον χάρτη 2.6 απεικονίζεται η κατανομή των διαφόρων ειδών καλλιέργειας στην ανάντη λεκάνη απορροής του Σπερχειού.



*Χάρτης 2.6: Χάρτης ειδών καλλιέργειας σε τμήμα της λεκάνης του Σπερχειού. (ΠΗΓΗ: Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε.)*

## **3 ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΟΤΑΜΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ**

### **3.1 Εισαγωγή**

Η υδρολογική προσομοίωση αποτελεί μια διαδικασία απεικόνισης των υδρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής με σκοπό τον υπολογισμό του πλημμυρογραφήματος της λεκάνης απορροής για διάφορες περιόδους επαναφοράς. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με την χρήση των προγραμμάτων HEC-GeoHMS και HEC-HMS.

Πιο συγκεκριμένα, το HEC-GeoHMS αποτελεί μια εργαλειοθήκη του περιβάλλοντος ArcMap. Προεπεξεργάζεται δεδομένα με σκοπό τη δημιουργία αρχείων εισόδου για την υδρολογική προσομοίωση. Οπτικοποιεί την χωρική πληροφορία προσδιορίζοντας την μορφή της μισγάγγειας, τις υπολεκάνες που σχηματίζονται καθώς και άλλα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ποταμού που εξετάζεται.

Τα δεδομένα αυτά εισάγονται στο HEC-HMS με στόχο την μοντελοποίηση των υδρολογικών χαρακτηριστικών του ανάντη τμήματος του Σπερχειού. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναφέρονται στις αποκρίσεις πλημμυρών για περιόδους επαναφοράς  $T=20$ ,  $T=100$ ,  $T=500$  και  $T=1000$  έτη, όπως ορίζεται και από την Ευρωπαϊκή Οδηγία για της πλημμύρες 2007 / 60.

Οι παροχές αιχμής πλημμύρας θα αποτελέσουν δεδομένα εισόδου για την υδραυλική προσομοίωση του ποταμού Σπερχειού.

### **3.2 Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση της λεκάνης**

Η προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων αποτελεί μια διαδικασία παραγωγής αρχείων που περιέχουν υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης απορροής. Αυτή ολοκληρώνεται με την βοήθεια του HEC-GeoHMS.

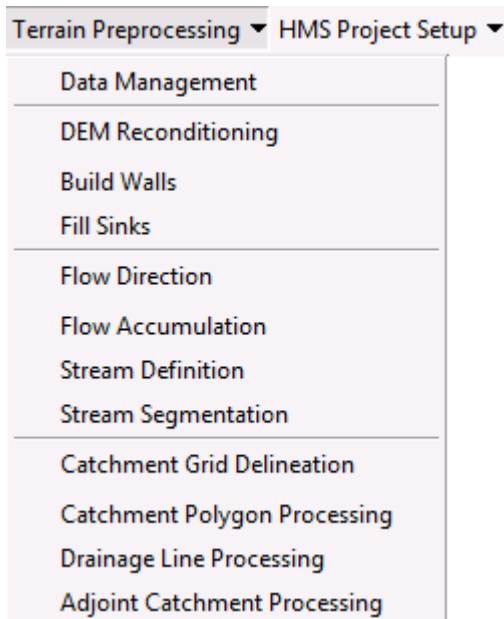
Ως αρχικό δεδομένο εισάγεται το ψηφιακό μοντέλο της περιοχής μελέτης. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους έχει ανάλυση pixel 25 x 25 m και φαίνεται στον παρακάτω Χάρτη 3.1.



*Χάρτης 3.3: Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού*

### 3.2.1 Προεπεξεργασία αρχικών δεδομένων

Η επεξεργασία των γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών επιτυγχάνεται μέσω των επιλογών της εντολής Terrain Preprocessing, οι οποίες εμφανίζονται στο Σχήμα 3.1.



*Σχήμα 3.1: Εντολές του μενού Terrain Preprocessing της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS.*



Ξεκινώντας με την εντολή DEM Reconditioning διορθώνονται τα ελλειπή ή λανθασμένα υψόμετρα κατά μήκος των ρεμάτων του ψηφιακού μοντέλου εδάφους με ανακατανομή των κελιών του καννάβου. Μέσω αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται η ακριβέστερη αποτύπωση της κοίτης του ποταμού.

Στην συνέχεια, εκτελείται η εντολή Fill Sinks με την οποία διορθώνονται τυχόν βυθίσματα στο ανάγλυφο. Στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους ενδέχεται να υπάρχουν κελιά με μικρότερη τιμή υψομέτρου από τα γειτονικά τους με αποτέλεσμα να μην ολοκληρώνεται η υδρολογική ανάλυση, αφού παρακωλύεται η ροή του νερού.

Η επόμενη φάση της υδρολογικής ανάλυσης συνίσταται στην δημιουργία ενός grid που θα εμπεριέχει την πληροφορία για την διεύθυνση της ροής του νερού (Flow Direction). Η διεύθυνση της απορροής ορίζεται από κάθε εικονοστοιχείο προς ένα από τα οκτώ γειτονικά του κατά την διεύθυνση της μέγιστης κλίσης, αφού το νερό τείνει να ρέει από τα σημεία μεγαλύτερου υψομέτρου προς τα σημεία χαμηλότερου, συνυπολογίζοντας και την μεταξύ τους απόσταση. Υπολογίζονται, δηλαδή, οι κλίσεις προς κάθε ένα από τα λοιπά οκτώ φατνία βάσει του παρακάτω τύπου:

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

όπου

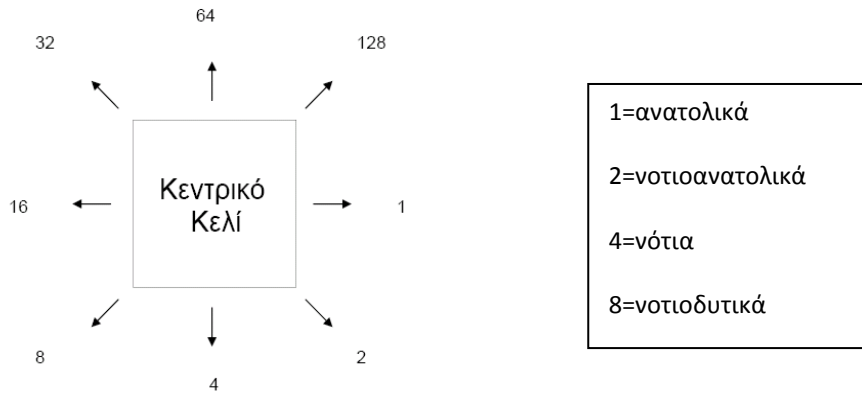
$\Delta z$  : η διαφορά των τιμών του υψομέτρου και

$\Delta x$  : η απόσταση μεταξύ γειτονικών κελιών.

Η απόσταση  $\Delta x$  μετράται από τα κεντροειδή των κελιών και είναι ίση με 1 όταν γειτνιάζουν έχοντας κοινή μια πλευρά και ίση με  $\sqrt{2}$  όταν έχουν μια κορυφή κοινή (Μισθού, 2006).

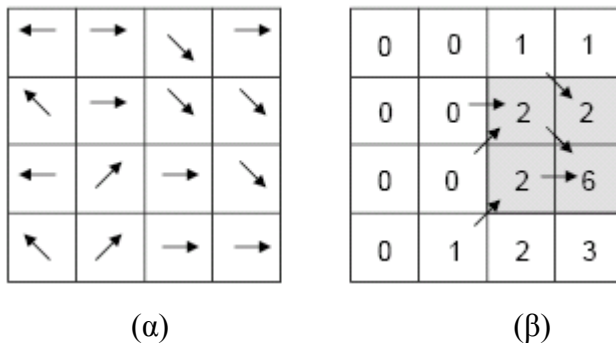
Εφόσον υπολογιστεί η πλέον μέγιστη κλίση, η πληροφορία της διεύθυνσης της ροής κωδικοποιείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Η μέθοδος αυτή δεν επιτρέπει την ροή προς πολλά φατνία, αλλά μόνο προς ένα.





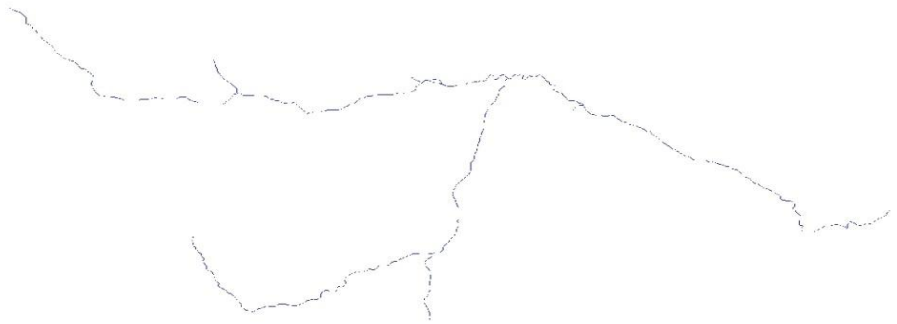
Σχήμα 3.2: Κωδικοποίηση της διεύθυνσης ροής της ESRI. (ΠΗΓΗ DeMers, 2000)

Με την βοήθεια του καννάβου διεύθυνσης ροής ορίζεται ο κάρναβος της συγκεντρωτικής ροής, ο οποίος περιγράφει τον αριθμό των φατνίων ανάντη της κοίτης που θα μεταβεί το νερό προκειμένου να καταλήξει σε κάθε κελί. Σε κάθε φατνίο καταχωρείται μία τιμή, η οποία φανερώνει τον αριθμό των φατνίων διαμέσου των οποίων διέρχεται το νερό. Στις κορυφογραμμές οι τιμές αυτές είναι κοντά στο 0, ενώ στις κεντρικές κοίτες των ποταμών αναμένεται να υπάρχουν υψηλές τιμές. Αυτή η διαδικασία ολοκληρώνεται μέσω της εντολής Flow Accumulation (Σχήμα 3.3).



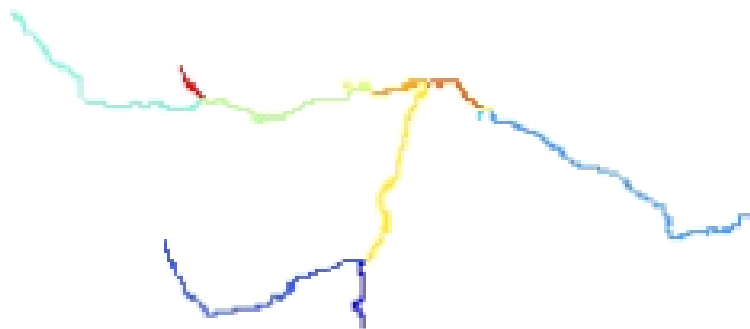
Σχήμα 3.3: (α) Πίνακας διεύθυνσης ροής, (β) Πίνακας συγκεντρωτικής ροής (ΠΗΓΗ: Chang, 2002)

Θέτοντας ένα κατώφλι στην τιμή της συγκεντρωτικής ροής και με την παραδοχή ότι για τιμές μικρότερες αυτού δεν υφίσταται συγκεντρωτική ροή, απεικονίζεται ένα αποστραγγιστικό δίκτυο πλήρως συνδεδεμένο. (Chang, 2003) Έτσι σχηματοποιείται το δίκτυο ροής της περιοχής μελέτης. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω της εντολής Stream Definition και το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



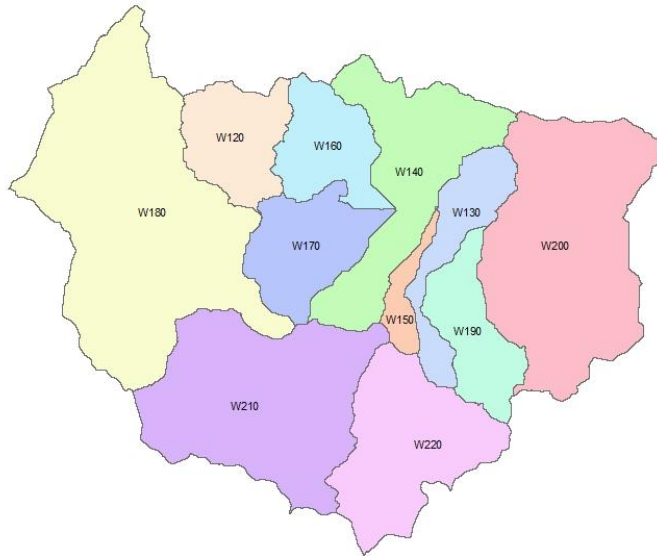
*Σχήμα 3.4: Υδρογραφικό δίκτυο της ανάντη περιοχής του Σπερχειού.*

Το υδατόρευμα χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα με βάση την κατηγοριοποίηση του υδρογραφικού δικτύου, μέσω της εντολής Stream Segmentation, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.5.



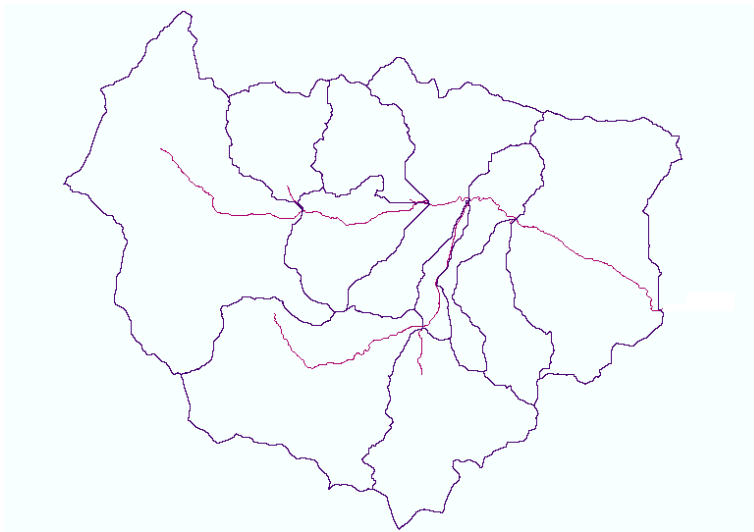
*Σχήμα 3.5: Διαχωρισμός του υδατορεύματος σε τμήματα.*

Ορίζονται οι υπολεκάνες για κάθε τμήμα του υδατορεύματος, όπως αυτά προέκυψαν από την παραπάνω διαδικασία. Η οριοθέτηση των υπολεκανών γίνεται με την εντολή Catchment Grid Delineation, και φαίνονται στο Σχήμα 3.6.



**Σχήμα 3.6:** Διαχωρισμός σε υπολεκάνες βάσει του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής.

Με την εντολή Catchment Polygon Processing μετατρέπονται τις υπολεκάνες από μορφή grid σε διανυσματική μορφή ενώ με την εντολή Drainage Line Processing το υδρογραφικό δίκτυο μετατρέπεται και αυτό σε διανυσματική μορφή. Στο παρακάτω Σχήμα 3.7 απεικονίζονται οι λεκάνες και τα υδατόρευμα όπως προέκυψαν.



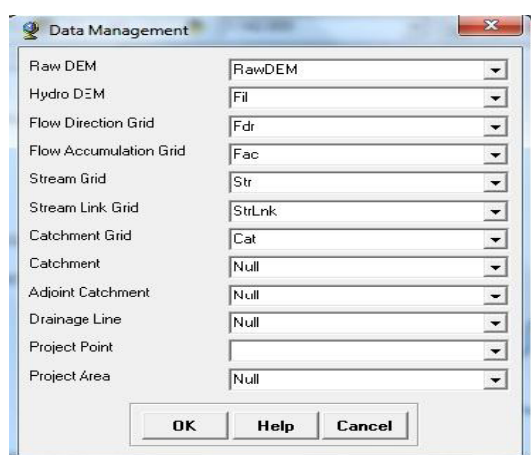
**Σχήμα 3.7:** Απεικόνιση των υπολεκανών και του υδατορέυματος σε διανυσματική μορφή (vector)

Τέλος, αθροίζονται όλες οι ανάντη υπολεκάνες σε κάθε συμβολή του ποταμού με την εντολή Adjoint Catchment Processing.



### 3.2.2 Δημιουργία αρχείων εισόδου για την υδρολογική προσομοίωση

Μετά την ολοκλήρωση της υδρολογικής ανάλυσης της περιοχής ορίζεται η περιοχή μελέτης με τον προσδιορισμό του σημείου εξόδου. Η περιοχή μελέτης καλύπτει την περιοχή ανάντη του σημείου εξόδου. Για την εκτέλεση της παραπάνω διαδικασίας χρησιμοποιείται το μενού HMS Project Setup της εργαλειοθήκης του HEC-GeoHMS.

Δημιουργείται, αρχικά, ένα νέο αρχείο στο οποίο δίνεται όνομα και ορίζονται οι μήτρες δεδομένων για τα παρακάτω δεδομένα όπως αναφέρονται στο Σχήμα 3.8.



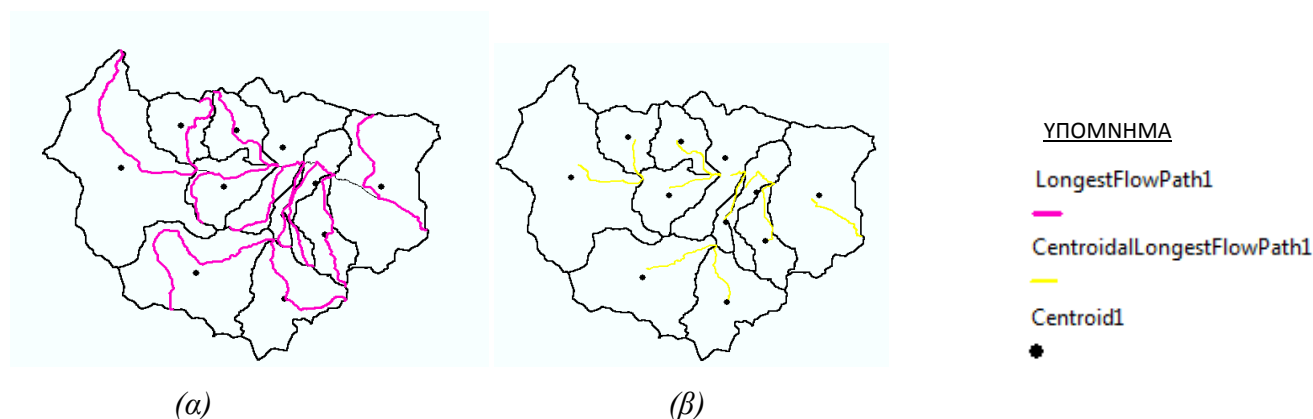
Σχήμα 3.8: Μήτρες δεδομένων για την δημιουργία αρχείων εισόδου του HEC-HMS.

Προσδιορίζεται το σημείο εξόδου με τη βοήθεια του εργαλείου Add Project Points (  ) και παράγεται η περιοχή μελέτης με την εντολή Generate Project. Επίσης δίνεται η δυνατότητα, με χρήση του εργαλείου Identify Contributing Area (  ), να δημιουργηθούν υπολεκάνες στα σημεία που υπάρχουν σταθμοί απορροής. Αυτό έχει ως σκοπό την πραγματοποίηση ελέγχου των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από την υδρολογική προσομοίωση με δεδομένα μετρήσεων που μπορεί να υπάρχουν στην περιοχή μελέτης. Στην παρούσα εργασία στάθμη μέτρησης παροχής υπάρχουν στο σημείο εξόδου, όπου βρίσκονται οι Κομποτάδες, και κοντά στην έξοδο της υπολεκάνης W150, περιοχή Καστρί, όπου δε κρίθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί υπολεκάνη αφού δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για περαιτέρω επαλήθευση των αποτελεσμάτων της υδρολογική προσομοίωσης.

Υπολογίζονται, επίσης, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των υπολεκανών τα οποία θα αποτελέσουν δεδομένα εισόδου στην υδρολογική προσομοίωση με σκοπό την διαμόρφωση των υδρολογικών παραμέτρων. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι:

- Το μήκος των τμημάτων του ποταμού (River Length).
- Η κλίση του ποταμού (River Slope).
- Οι κλίσεις των υπολεκανών (Basin Slope).
- Το κέντρο βάρους της κάθε υπολεκάνης (Basin Centroid).
- Το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής της υπολεκάνης μέχρι την έξοδο (Longest Flowpath).
- Το μήκος της υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδο αυτής (Centroidal Flowpath).

Στο Σχήμα 3.9 που ακολουθεί απεικονίζονται το μέγιστο μήκος της υδάτινης διαδρομής και το μήκος διαδρομής από το κέντρο βάρους έως την έξοδο. Επίση φαίνονται και το κέντρο βάρους της κάθε υπολεκάνης.

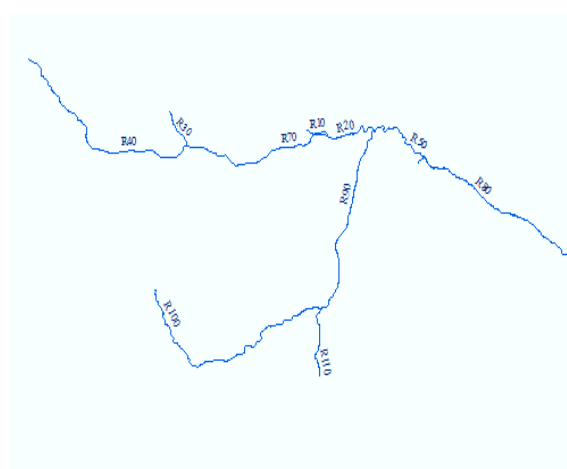


**Σχήμα 3.9:** (α) μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής, (β) μήκος διαδρομής από κέντρο βάρους έως την έξοδο.

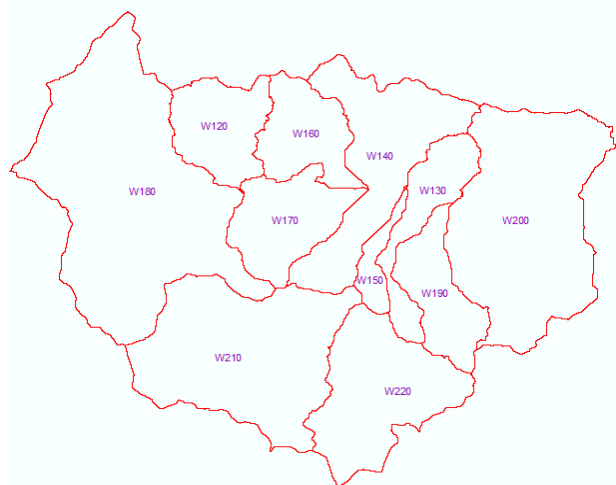
Στον Πίνακα 3.1 αναφέρονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τμημάτων του υδατορεύματος και των υπολεκανών της περιοχής μελέτης, ενώ στο Σχήμα 3.10 φαίνεται η ονομασία των τμημάτων του ποταμού και των υπολεκανών τους.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των τμημάτων του υδατορεύματος και των υπολεκανών.

ΟΝΟΜΑ ΠΟΤΑΜΟΥ	ΜΗΚΟΣ ΠΟΤΑΜΟΥ (m)	ΟΝΟΜΑ ΛΕΚΑΝΗΣ	ΠΕΡΙΜΕΤΡΟΣ ΛΕΚΑΝΗΣ (m)	ΕΜΒΑΔΟ ΛΕΚΑΝΗΣ (m <sup>2</sup> )	ΚΛΙΣΗ ΛΕΚΑΝΗΣ (%)
R10	1877.449	W160	50050.000	52436875.000	0.045
R20	3923.833	W140	90100.000	109765625.000	0.036
R30	2458.668	W120	47300.000	56043750.000	0.073
R40	14821.436	W180	115000.000	267376875.000	0.016
R50	5325.914	W130	62450.000	45740000.000	0.143
R60	626.409	W190	49050.000	51646250.000	0.073
R70	11321.194	W170	48650.000	62851875.000	0.036
R80	15456.512	W200	85050.000	191401875.000	0.014
R90	11825.788	W150	34050.000	15489375.000	0.117
R100	16832.248	W210	82050.000	169957500.000	0.021
R110	4342.399	W220	66150.000	106017500.000	0.024



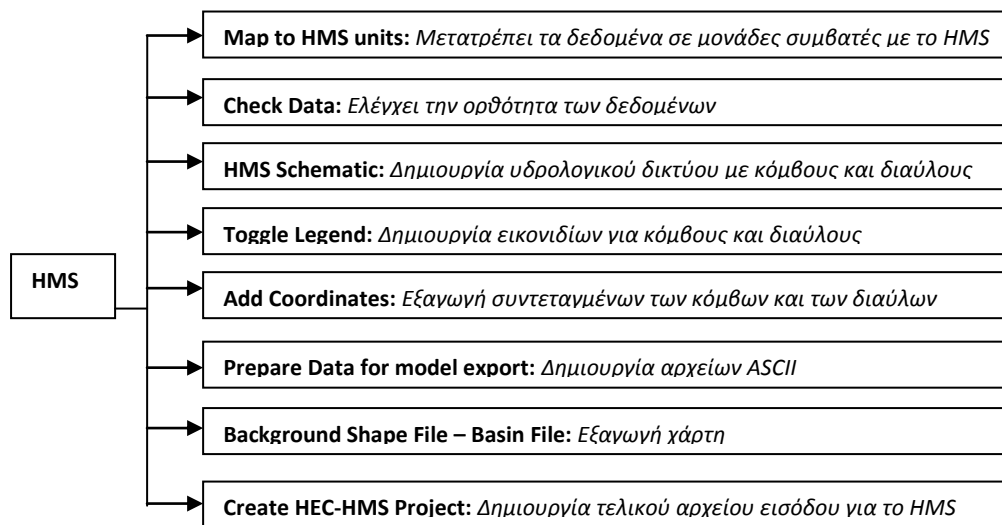
(α)



(β)

Σχήμα 3.10: (α) Ονομασία παραποτάμων και (β) Ονομασία λεκανών

Με την χρήση των παραπάνω αρχείων σχηματοποιείται το υδρογραφικό δίκτυο, σε μορφή συμβατή με το HEC-HMS. Με μια αλληλουχία εντολών δημιουργείται το μοντέλο της υδραυλικής προσομοίωσης ενώ τα δεδομένα του υδρολογικού δικτύου κωδικοποιούνται σε μορφή ASCII. Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται σχηματικά στο ακόλουθο Σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.11: Δημιουργία υποβάθρου HMS

### 3.3 Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής

Η υδρολογική προσομοίωση αποτελεί μια αναπαράσταση του υδρογραφικού δικτύου της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού με σκοπό τις υδρολογικές αποκρίσεις αυτής για συγκεκριμένα επεισόδια βροχής. Αυτή επιτυγχάνεται με την χρήση του λογισμικού πακέτου HEC-HMS.

Το HEC-HMS ανήκει στην κατηγορία των προσδιοριστικών παραμετρικών μοντέλων. Μετατρέπει τη βροχή σε απορροή στηριζόμενο στην θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για αστικές όσο και για αγροτικές περιοχές. Βρίσκει εφαρμογές σε θέματα διαχείρισης υδάτινων πόρων, σε μελέτες πρόγνωσης πλημμυρών, στο σχεδιασμό υπερχειλιστών κ.α.

Περιγράφει τον υδρολογικό κύκλο και τον εξετάζει τμηματικά. Για κάθε τμήμα του υδρολογικού κύκλου δίνεται μια πληθώρα επιλογών στον χρήστη, ο οποίος διαλέγει την κατάλληλη ανάλογα με τον στόχο της υδρολογικής μελέτης, την εμπειρία του αλλά και τα διαθέσιμα στοιχεία που υπάρχουν για την περιοχή μελέτης. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα για σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μεθόδων που προσομοιώνουν κάθε διαδικασία του υδρολογικού κύκλου.

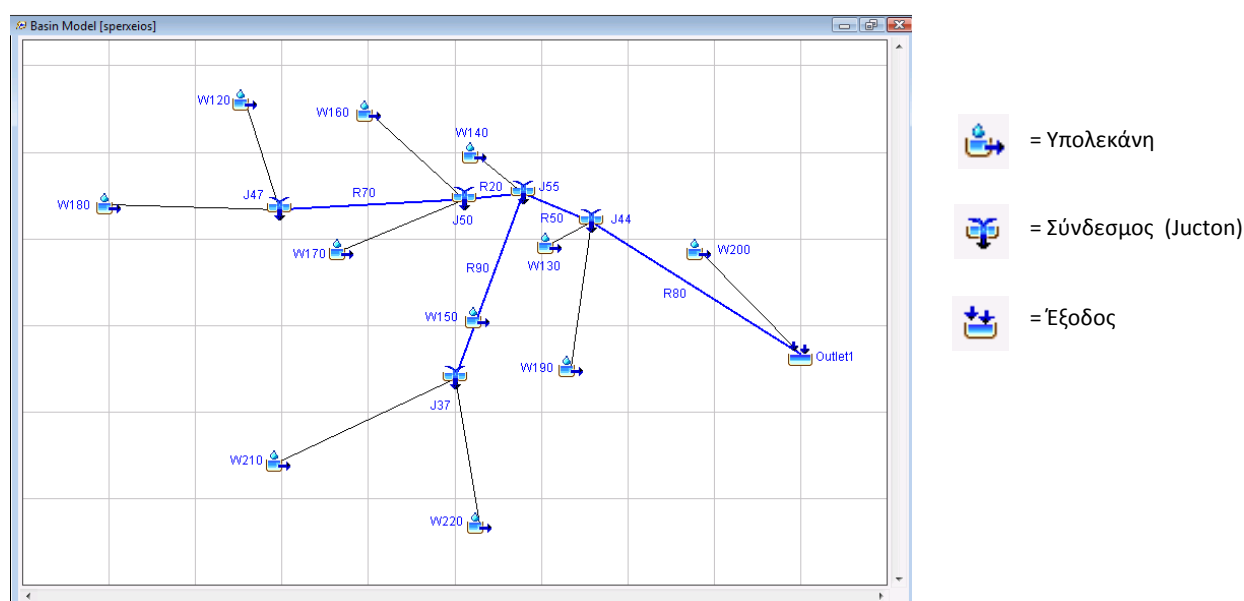
Ωστόσο, αποτελεί μια απλοποίηση του πραγματικού υδρολογικού συστήματος αφού γίνονται κάποιες παραδοχές. Θεωρεί την υπεδάφια και επιφανειακή ροή ως

άμεση απορροή και αγνοεί την εξατμοδιαπνοή. Επίσης, η λεπτομερής περιγραφή της κίνησης του νερού εντός του υδροφορέα μπορεί να παραληφθεί.

Για την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος της απορροής απαιτούνται οι εξής υπολογισμοί:

- Απώλειες βροχής
- Άμεση απορροή
- Βασική απορροή
- Διόδευση πλημμυρογραφήματος

Αρχικά, εισάγεται το μοντέλο της λεκάνης απορροής, όπως αυτό δημιουργήθηκε από το HEC-GeoHMS. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την εντολή HEC-HMS / File / Import Basin Model (Σχήμα 3.12). Δίνεται ακόμη η δυνατότητα για παράθεση των χαρτών της λεκάνης και του ποταμού ως υπόβαθρο για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.12: Μοντέλο λεκάνης απορροής στο HEC-HMS

### 3.3.1 Απώλειες Βροχής

Η εκτίμηση των απωλειών της βροχής εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της λεκάνης όσο και από τα χαρακτηριστικά της βροχής. Πέρα από την αναλυτική εκτίμηση των απωλειών λόγω συγκράτησης και διήθησης υπάρχει η ανάγκη αδρομερούς εκτίμηση των απωλειών με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να



συσχετιστούν με την άμεση απορροή. Αυτό επιτυγχάνεται με μετρημένα στοιχεία βροχόπτωσης απορροής. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται διάφοροι δείκτες που μπορούν μετά να χρησιμοποιούνται για την λεκάνη και οποιαδήποτε βροχή για τον προσδιορισμό του περισσεύματος της βροχής.

Σύμφωνα με μια προσέγγιση οι συνολικές απώλειες μπορούν αδρομερώς να εκτιμηθούν ως περίπου ίσες με την αθροιστική ποσότητα διήθησης που ακολουθεί το φαινόμενο της βροχής (Γσακίρης, 1995).

Στις περιπτώσεις που δεν υπάρχουν μετρήσεις για τις διάφορες απώλειες η εκτίμηση του περισσεύματος βροχής καθίσταται δύσκολη. Η υπηρεσία Soil Conservation Service των ΗΠΑ παρουσίασε μία μέθοδο υπολογισμού του ύψους περισσεύματος βροχής από μια δεδομένη βροχή με την βοήθεια τριών μεταβλητών, του ύψους βροχής, της αρχικής κατάστασης υγρασίας του εδάφους και του ποσοστού διαπερατότητας του εδάφους. Παρακάτω αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού των απωλειών βροχής και περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού και εισαγωγής των απωλειών βροχής στο HEC-HMS.

#### ➤ Το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού των απωλειών βροχής

Πιο ρεαλιστική μέθοδος για τον υπολογισμό των απωλειών είναι η μέθοδος SCS του Αμερικανικού Soil Conservation Service. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Σε ένα χρονικό διάστημα  $t_{a0}$  όλη η πραγματική (ακαθάριστη) βροχόπτωση, συνολικού ύψους  $h_{a0}$  μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε έλλειμμα (αρχικό έλλειμμα), χωρίς να δίνει καθόλου ενεργή βροχόπτωση. Κατά συνέπεια, μετά τον χρόνο  $t_{a0}$  το μέγιστο ενεργό ύψος βροχής  $h_e$  δεν μπορεί να υπερβεί το δυνητικό μέγεθος ( $y=h-h_{a0}$ ), όπου  $h$  το τελικό ύψος βροχής.
- Το επιπλέον, πέραν του αρχικού  $h_{a0}$ , ελλειμματικό ύψος που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια βροχόπτωση με μεγάλο ολικό ύψος  $h$  δεν μπορεί να ξεπεράσει τη μέγιστη τιμή  $S$ , γνωστή ως δυνητικά μέγιστη κατακρήμνιση.
- Σε κάθε χρονική στιγμή μετά τον χρόνο  $t_{a0}$ , οι λόγοι του ενεργού ύψους βροχής  $h_e$  και του ελλειμματικού ύψους μείον το αρχικό έλλειμμα προς τα αντίστοιχα δυνητικά μεγέθη ( $y$  και  $S$  αντίστοιχα) είναι ίσοι. Συμβολικά: (Κουτσογιάννης Δ. και Ξανθόπουλος Θ., 1999)

$$he = \begin{cases} 0 & h \leq h_{a0} \\ \frac{(h - h_{a0})^2}{h - h_{a0} + S} & h > h_{a0} \end{cases} \quad (3.1)$$

• Η παραπάνω εξίσωση (3.1) δίνει σε κάθε στιγμή το ενεργό ύψος  $he$  συναρτήσει του ταυτόχρονου ολικού ύψους  $h$  και δύο παραμέτρων, των  $h_{a0}$  και  $S$ . Για περαιτέρω απλοποίηση, υιοθετείται η επιπλέον παραδοχή ότι  $h_{a0} = 0,2S$ , η οποία θεωρείται ως η βέλτιστη προσέγγιση από δεδομένα παρατηρήσεων. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τελικώς μόνο μία παράμετρο, την  $S$ . Με αυτή την επιπλέον παραδοχή η εξίσωση (3.1) γράφεται όπως φαίνεται παρακάτω (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999):

$$he = \begin{cases} 0 & h \leq h_{a0} \\ \frac{(h - 0.2S)^2}{h - 0.8S} & h > h_{a0} \end{cases} \quad (3.2)$$

Αν δεν υπάρχουν μετρήσεις απορροής, ακολουθείται μία εμπειρική μεθοδολογία εκτίμηση του  $S$ . Συγκεκριμένα, η παράμετρος  $S$  συνδέεται με μια άλλη χαρακτηριστική παράμετρο, την  $CN$ , η οποία είναι γνωστή ως αριθμός καμπύλης απορροής, με σχέση:

$$S [mm] = 254 * \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Η παράμετρος  $CN$  παίρνει τιμές από 0 έως 100. Εξαρτάται από τις συνθήκες εδάφους και χρήσης γης της λεκάνης απορροής, καθώς και τις προηγούμενες συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Για τον προσδιορισμό της παραμέτρου  $CN$ , η μέθοδος SCS κατατάσσει αρχικά τα εδάφη σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με την διαπερατότητά τους. Στη συνέχεια, ορίζει τρεις τύπους προηγούμενων συνθηκών υγρασίας. Οι κατηγορίες φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.2 και 3.3 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.2: Κατηγορίες εδαφών ανάλογα με την διαπερατότητα τους όπως ορίζονται από την SCS (Κουτσογιάννης Δ. και Ξανθόπουλος Θ., 1999).

<b>Ομάδα Α:</b> Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό
ποσοστό ιλύος και αργίλου.
<b>Ομάδα Β:</b> Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμμώδης πηλός.
<b>Ομάδα C:</b> Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.
<b>Ομάδα D:</b> Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβρέχουν, πλαστικές άργιλοι, εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια.

Πίνακας 3.3: τύποι προηγηθέντων συνθηκών υγρασίας κατά την μέθοδο SCS (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

<b>Τύπος I:</b> Ξηρές συνθήκες, οι οποίες αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μικρότερη των 13 mm (ή 35 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
<b>Τύπος II:</b> Μέσες συνθήκες, οι οποίες αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεταξύ 13 και 38 mm (ή 35-53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
<b>Τύπος III:</b> Υγρές συνθήκες, οι οποίες αντιστοιχούν σε βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών μεγαλύτερη των 38 mm (ή 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Για συνθήκες υγρασίας τύπου II, η SCS δίνει σε πίνακα τις τιμές του CN για κάθε ομάδα εδαφών και για διάφορες χρήσεις γης, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.4 (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Πίνακας 3.4: Πίνακας τιμών CN για συνθήκες υγρασίας τύπου II.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΧΡΗΣΗΣ ΓΗΣ		ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΣ ΤΥΠΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ			
		A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις		62 - 72	71 - 81	78 - 88	81 - 91
Λιβάδια, βοσκότοποι		30 - 68	58 - 79	71 - 86	78 - 89
Δάση		25 - 45	55 - 66	70 - 77	77 - 83
Ανοιχτοί χώροι, πάρκα, νεκροταφεία κτλ.					
• με κάλυψη από πράσινο > 75%		39	61	74	80
• με κάλυψη από πράσινο 50 - 75%		89	92	79	84
Εμπορικές περιοχές		81	88	91	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)		81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές					
Μέσο μέγεθος οικοπέδου (στρ)	Ποσοστό αδιαπέρατης επιφάνειας (%)				
≤ 0.5	65	77	85	90	92
1	38	61	75	83	87
1.5	30	57	72	81	86
2	25	54	70	80	85
4	20	51	68	79	84
Δρόμοι					
• με οδόστρωμα και δίκτυο ομβρίων		98	98	98	98
• χαλκόστρωτοι		76	85	89	91
• χωματόστρωτοι		72	82	87	89

### ➤ Υπολογισμός και εισαγωγή απωλειών βροχής

Η παραπάνω διαδικασία γίνεται για κάθε υπολεκάνη της εξεταζόμενης περιοχής. Επειδή σε κάθε υπολεκάνη υπάρχουν περισσότερες από μία χρήσεις γης και τύπο εδάφους, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος όρος την παραμέτρου CN μέσω της σχέσης:

$$CN = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (3.4)$$

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή CN ακολουθείται μια διαδικασία η οποία ολοκληρώνεται με την βοήθεια των εντολών ArcMap. Αρχικά εισάγονται ο

χάρτης των υπολεκανών και οι χάρτες χρήσεων γης και γεωλογίας. Για κάθε υπολεκάνη επικαλύπτονται οι δύο χάρτες και δημιουργείται ένας πίνακας που περιέχει τις κατηγορίες χρήσης γης και τους υδρολιθολογικούς σχεδιασμούς που περιλαμβάνονται στη υπολεκάνη. Υπολογίζεται ο συντελεστής CN για κάθε γραμμή του πίνακα και τέλος υπολογίζεται ο μέσος όρος CN της κάθε υπολεκάνης, όπου οι αντίστοιχες τιμές φαίνονται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5: Τιμή CN που αντιστοιχεί σε κάθε υπολεκάνη της περιοχής μελέτης.

<b>ΥΠΟΛΕΚΑΝΗ</b>	<b>ΤΙΜΗ CN</b>
W120	83
W130	79
W140	83
W150	82
W160	84
W170	81
W180	81
W190	76
W200	76
W210	81
W220	71

Ο συντελεστής CN εισάγεται στο HEC-HMS στο παράθυρο Loss που εμφανίζεται στο κύριο μενού της Κάθε υπολεκάνης. Ζητείται να προσδιοριστούν και άλλα δύο ακόμη πεδία που αναφέρονται στο αρχικό έλλειμμα (Initial Abstraction) και το ποσοστό των αδιαπέρατων σχηματισμών (Impervious (%)) στη κάθε υπολεκάνη. Το πεδίο του αρχικού ελλείμματος στην παρούσα εργασία δεν συμπληρώνεται, με αποτέλεσμα να θεωρείται από ο πρόγραμμα ότι ισούται με το 20% της δυνητικής μέγιστης κατακράτησης. Σε αυτή την θεωρία βασίζεται και υπολογισμός του ενεργού ύψους βροχής. Στο πεδίο των αδιαπέρατων σχηματισμών συμπληρώνεται με την τιμή που αντιστοιχεί στο πηλίκο των αδιαπέρατων σχηματισμών της υπολεκάνης, όπως προκύπτουν από τον γεωλογικό χάρτη, προς της έκταση αυτής (Σχήμα 3.13).

Subbasin	Loss	Transform	Options
<b>Basin Name: sperxeios</b>			
<b>Element Name: W200</b>			
Initial Abstraction (IN)	<input type="text"/>		
*Curve Number:	76		
*Impervious (%)	0.0		

Σχήμα 3.4: Παράθυρο εισαγωγής στοιχείων για τις απώλειες της βροχόπτωσης στο HEC-HMS.

### 3.3.2 Άμεση απορροή

Η άμεση απορροή σχετίζεται ευθέως με την ενεργό βροχόπτωση. Ουσιαστικά η άμεση απορροή σε μια δεδομένη λεκάνη απορροής, αποτελεί μετασχηματισμό της ενεργού βροχής, ο οποίος χαρακτηρίζεται αφενός από μια χρονική υστέρηση, λόγω του χρόνου που απαιτεί η διαδρομή του νερού μέχρι να φτάσει στην έξοδο της λεκάνης, και αφετέρου από τη διατήρηση της ολικής μάζας ή του όγκου.

Η άμεση απορροή υπολογίζεται από την συνολική βροχόπτωση με την αφαίρεση των απωλειών. Ωστόσο, από αυτή τη διαδικασία δεν υπολογίζεται η χρονική κατανομή της απορροής. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν διάφορα μοντέλα. Το μοντέλο υπολογισμού της άμεσης απορροής αλλά και της χρονικής κατανομής της που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία στηρίζεται στην θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος. Γενικά, τα μοντέλα που στηρίζονται στην θεωρία αυτή από εμπειριέχουν απλουστευμένες παραδοχές και περιορισμούς, παρέχουν αρκετά καλές προσεγγίσεις και είναι πιο εύκολα στην εφαρμογή τους. Παρακάτω αναλύεται η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος και η εισαγωγή αυτού στην υδρολογική προσομοίωση.

#### ➤ Η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος

Ως μοναδιαίο υδρογράφημα μιας βροχής διάρκειας περισσέυματος  $t_R$  ομοιόμορφα κατανεμημένης σε μια λεκάνη απορροής ονομάζεται το αντίστοιχο υδρογράφημα της άμεσης απορροής που προήλθε από περίσσειμα βροχής  $h_R = 10$  mm. Το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι ουσιαστικά ένα μοντέλο που περικλείει όλα τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και αναφέρεται στην συγκεκριμένη διάρκεια περισσέυματος βροχής.

Η χρησιμότητά του είναι μεγάλη αφού μπορεί να μετασχηματίσει κάτω από ορισμένες παραδοχές οποιαδήποτε περίσσειμα ραγδαίας βροχής διαφορετικής έστω διάρκειας σε υδρογράφημα της άμεσης απορροής. (Τσακίρης, 1995)

Οι αρχές που στηρίζεται η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι οι ακόλουθες:

i. αρχή της αναλογίας

ii. αρχή της επαλληλίας

Σύμφωνα με την πρώτη, δύο βροχές με περίσσειμα βροχής της ίδια διάρκειας και διαφορετικές εντάσεις δημιουργούν υδρογράφημα άμεσης απορροής με την ίδια χρονική βάση αλλά με τεταγμένες σε κάθε χρονική στιγμή που έχουν λόγο μεταξύ τους ίσο με τον λόγο των εντάσεων. Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας το συνολικό υδρογράφημα άμεσης απορροής που προκύπτει από επιμέρους βροχοπτώσεις είναι το υδρογράφημα με τεταγμένες το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων (Τσακίρης, 1995).

Ωστόσο, η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος στηρίζεται στις εξής παραδοχές, από τις οποίες βασικά πηγάζουν οι παραπάνω αρχές (Μιμίκου και Μπάλτας, 2003):

i. Σε μια συγκεκριμένη λεκάνη απορροής, ενεργές βροχές ίσης διάρκειας αλλά με διαφορετική ένταση, δίνουν υδρογραφήματα άμεσης απορροής με ίδια χρονική βάση.

ii. Η κατανομή του περισσεύματος βροχής στο χώρο και τον χρόνο είναι η ίδια για βροχές με την ίδια διάρκεια.

iii. Για μια λεκάνη απορροής το σχήμα του μοναδιαίου υδρογραφήματος δεδομένης διάρκειας βροχής αντιπροσωπεύει τα φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

iv. Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες ή επόμενες βροχοπτώσεις.

Η μέθοδος του μοναδιαίου υδρογραφήματος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των πλημμυρών σχεδιασμού. Η άμεση κατάρτιση μοναδιαίων υδρογραφημάτων είναι αδύνατη στην περίπτωση που δεν υπάρχει εγκαταστημένος σταθμηγράφος σε κανένα σημείο της λεκάνης. Έτσι, χρησιμοποιείται η τεχνική του συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος, η οποία αποτελεί ένα κοινώς αποδεκτό εργαλείο σε λεκάνες όπου δεν διατίθενται στοιχεία από πραγματικά επεισόδια βροχής. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση των μεγεθών της πλημμύρας.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αυτή του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας που, χάρη στην απλότητά της, έχει τύχει ευρείας εφαρμογής στο σχεδιασμό αντιπλημμυρικών έργων στην Ελλάδα.

Η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας χρησιμοποιεί τοπογραφικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης, καθώς και δεδομένα κλίσεων που προκύπτουν από τη μηκοτομή του κύριου υδατορεύματος. Η εν λόγω μέθοδος συνιστά τη σύνθεση τριγωνικού υδρογραφήματος για διάρκεια βροχής  $d = 1$  h, όπως αυτό του Σχήματος 3.14. Ο χρόνος ανόδου του υδρογραφήματος (σε h) υπολογίζεται συναρτήσει των χαρακτηριστικών της λεκάνης από τη σχέση (Κουτσογιάννης, 2003):

$$t_p = \frac{46.6 * L^{0.14}}{S_{1085}^{0.38} (1 + URBAN)^{1.99} RSM D^{0.4}} \quad (3.5)$$

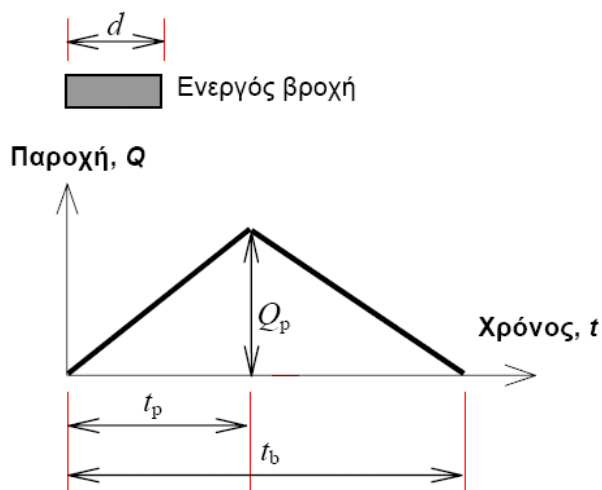
όπου

- $L$  : το μήκος της μισγάγγειας κατά μήκος του κύριου υδατορεύματος της λεκάνης (σε km)
- $S_{1085}$  : η χαρακτηριστική κλίση της λεκάνης (σε m/km), η οποία εκτιμάται λαμβάνοντας δύο χαρακτηριστικά σημεία της μηκοτομής του κύριου υδατορεύματος της λεκάνης, σε απόσταση 10% και 85% αντίστοιχα του ολικού μήκους του από την έξοδο της λεκάνης,
- URBAN : το ποσοστό της λεκάνης με αστική ανάπτυξη, RSM D είναι παράμετρος μεγέθους βροχοπτώσεων, που για ορεινές ή ημιορεινές λεκάνες απορροής ταυτίζεται με το μέγιστο καθαρό επιφανειακό ύψος βροχής διάρκειας 24 h, περιόδου επαναφοράς 5 ετών (σε mm).

Η διάρκεια πλημμύρας (ή χρόνο βάσης) ισοδυναμεί με:

$$t_b = 2.52 * t_p \quad (3.6)$$





**Σχήμα 3.14:** Τριγωνικό μοναδιαίο υδρογράφημα σύμφωνα με το Βρετανικό Ινστιτούτο Υδρολογίας (ΠΗΓΗ: Κουτσογιάννης, 2003)

Η παροχή αιχμής δίνεται από τον τύπο:

$$Q_p = \frac{2.2 * A}{t_p} \quad (3.7)$$

όπου

$t_p$  : χρόνος ανόδου

$t_b$  : χρόνος βάσης

Η μέθοδος του Βρετανικού Ινστιτούτου υπολογίζει το μοναδιαίο υδρογράφημα για διάρκεια βροχής μίας ώρας. Το χρονικό βήμα που επιλέχθηκε στην παρούσα μελέτη είναι 30 min. Για τον λόγο αυτόν, για τον υπολογισμό του μοναδιαίου υδρογραφήματος της κάθε υπολεκάνης χρησιμοποιήθηκε μια παραλλαγή της μεθόδου του Βρετανικού Ινστιτούτου. Έτσι για τον χρόνο ανόδου χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$t_p = 0.6 * t_c + \frac{d}{2} \quad (3.8)$$

όπου

$d$  : χρονικό βήμα

$$t_c = \frac{4 * A^{1/2} + 1.5L}{0.8 * \Delta H^{0.5}} \quad (3.9)$$

όπου

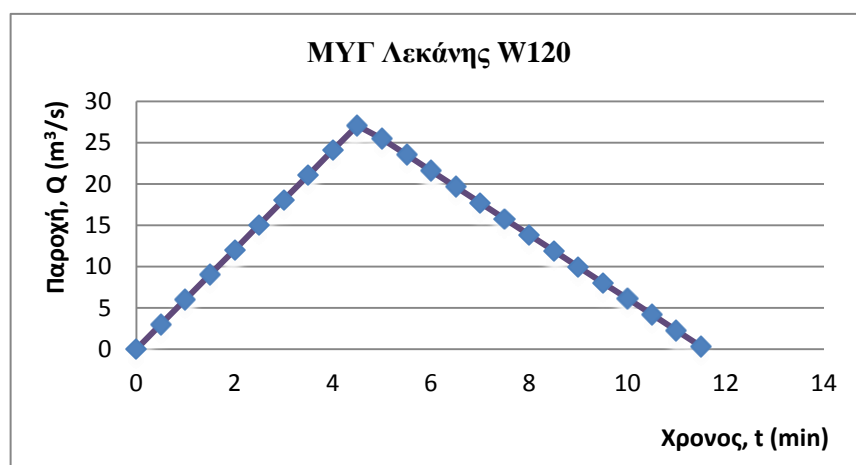
$A$  [ $\text{km}^2$ ] : εμβαδό λεκάνης

$L$  [ $\text{km}$ ] : μήκος ποταμού

$\Delta H$  [ $\text{m}$ ] : η διαφορά του μέσου υψομέτρου της λεκάνης από το υψόμετρο στην έξοδο.

### ➤ Εισαγωγή μοναδιαίου υδρογραφήματος στο HEC-HMS

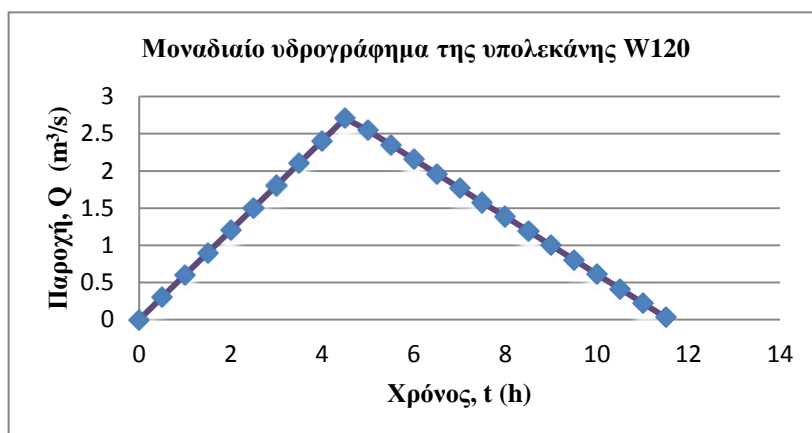
Από την παραπάνω διαδικασία προέκυψε το μοναδιαίο υδρογράφημα για κάθε υπολεκάνη. Στο παρακάτω Σχήμα 3.15 φαίνεται, ενδεικτικά, το μοναδιαίο υδρογράφημα της υπολεκάνης W120.



Σχήμα 3.15: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W120.

Σε προηγούμενη έκδοση του HEC-HMS το μοναδιαίο υδρογράφημα προκύπτει από βροχόπτωση ύψους 1 mm, σε αντίθεση με την μέθοδο του Βρετανικού Ινστιτούτου που θεωρεί βροχή ύψους 10mm. Κατέστη, λοιπόν, απαραίτητο να διαπιστωθούν οι παραδοχές που γίνονται στην έκδοση του HEC-HMS 3.4 για το μοναδιαίο υδρογράφημα. Με δεδομένα τα ύψη βροχής και το μοναδιαίο υδρογράφημα διαιρούμενο κατά 10 υπολογίζεται το πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για την υπολεκάνη W120 που είναι αδιαπέρατη σε ποσοστό 100%, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος excel. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης μέσω του HEC-HMS. Διαπιστώθηκε, λοιπόν, ότι το πρόγραμμα θεωρεί το μοναδιαίο

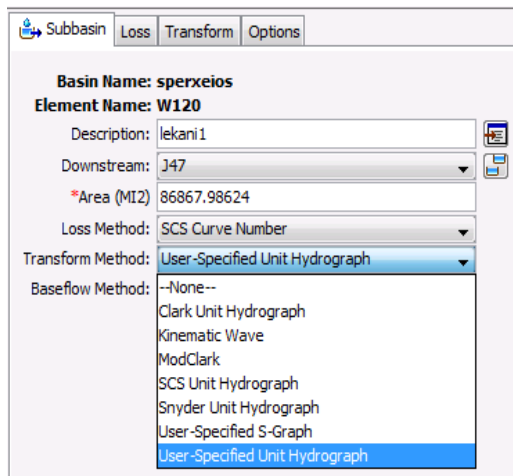
υδρογράφημα ως υδρογράφημα απορροής με ύψος βροχής 1 mm, με αποτέλεσμα να αλλαχθούν οι τιμές των μοναδιαίων υδρογραφημάτων για όλες τις υπολεκάνες. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται το νέο μοναδιαίο υδρογράφημα για την υπολεκάνη W120 στο Σχήμα 3.16.



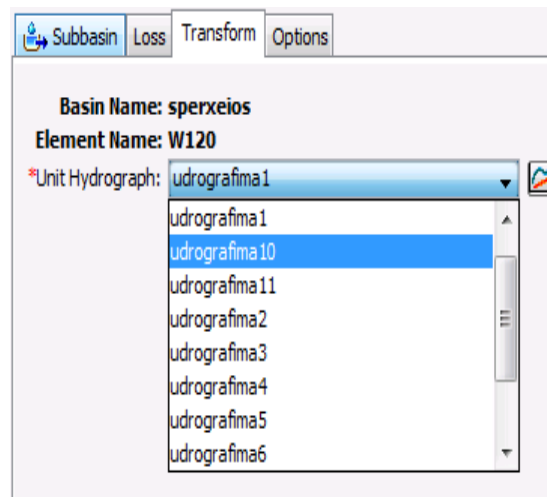
Σχήμα 3.16: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W120 διαιρούμενο κατά 10.

Η εισαγωγή των μοναδιαίων υδρογραφημάτων στο HEC-HMS γίνεται μέσω της εντολής HEC-HMS / Components / Paired Data Manager / Unit Hydrograph Curves, όπου δημιουργείται μια βάση στην οποία αποθηκεύονται όλα τα υδρογραφήματα των υπολεκανών.

Δίνεται η δυνατότητα επιλογής διαφόρων μεθόδων μοναδιαίου υδρογραφήματος μέσω του προγράμματος. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε μια παραλλαγή της μεθόδου του Βρετανικού Ινστιτούτου, όπως προαναφέρθηκε, η οποία εισάγεται στο πρόγραμμα ως User-Specified CI Hydrograph μέσω της βάσης Basin Models / Subbasin που έχει δημιουργηθεί με την εισαγωγή του μοντέλου προσομοίωσης από το HEC-GeoHMS. Η αντιστοιχία του κάθε υδρογραφήματος με την αντίστοιχη υπολεκάνη γίνεται μέσω της βάσης Basin Models / Transform, όπου επιλέγεται το κατάλληλο μοναδιαίο υδρογράφημα κάθε φορά (Σχήμα 3.17).



(α)



(β)

**Σχήμα 3.5:** (α) Επιλογή μεθόδου μοναδιαίου υδρογραφήματος, (β) αντιστοιχία μοναδιαίου υδρογραφήματος σε κάθε υπολεκάνη.

### 3.3.3 Βασική απορροή

Η βασική ροή οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στον μηχανισμό της υπόγειας ροής και γι' αυτό δεν επηρεάζεται αισθητά κατά τη διάρκεια των πλημμυρών. Λόγω έλλειψης δεδομένων δεν χρησιμοποιήθηκε στην υδρολογική προσομοίωση της περιοχής μελέτης. Η επιρροή της στο τελικό αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας δεν ήταν μεγάλη.

### 3.3.4 Διόδευση πλημμύρας

Η διόδευση πλημμύρας αποτελεί αυτή καθαυτή τη διέλευση μιας πλημμύρας μέσω ενός επιφανειακού υδροφορέα. Με τη διόδευση πλημμύρας παρατηρείται μια μείωση της αιχμής πλημμύρας που συνοδεύεται με μια καθυστέρηση. Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι στα φυσικά υδατορεύματα υπάρχει αποθηκευτικότητα που δημιουργεί αυτή την πτώση της αιχμής του υδρογραφήματος εκροής (Τσακίρης, 1995).

Για την περιγραφή της διόδευσης της πλημμύρας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εκτίμησης του χρόνου υστέρησης (Lag routing). Εισάγεται στα τμήματα του ποταμού στη βάση του μοντέλου της λεκάνης. Η μέση ταχύτητα ροής του νερού θεωρείται ίση με 1.2 m/s. Η εκτίμηση του χρόνου υστέρησης (lag time) είναι ίση με 30 min, όταν το μήκος που διανύει το νερό από την έξοδο της μίας λεκάνης μέχρι την επόμενη είναι

περίπου ίση με 4 km. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας με τις αντίστοιχες τιμές για κάθε τμήμα ποταμού.

Πίνακας 3.6: Τιμές χρόνου υστέρησης (lag time) για κάθε τμήμα του υδατορεύματος.

Reach	Lag Time (MIN)
R70	90
R20	30
R90	90
R50	30
R80	120

Οι παραπάνω τιμές εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω της εντολής HEC-HMS / Parameters / Routing / Lag.

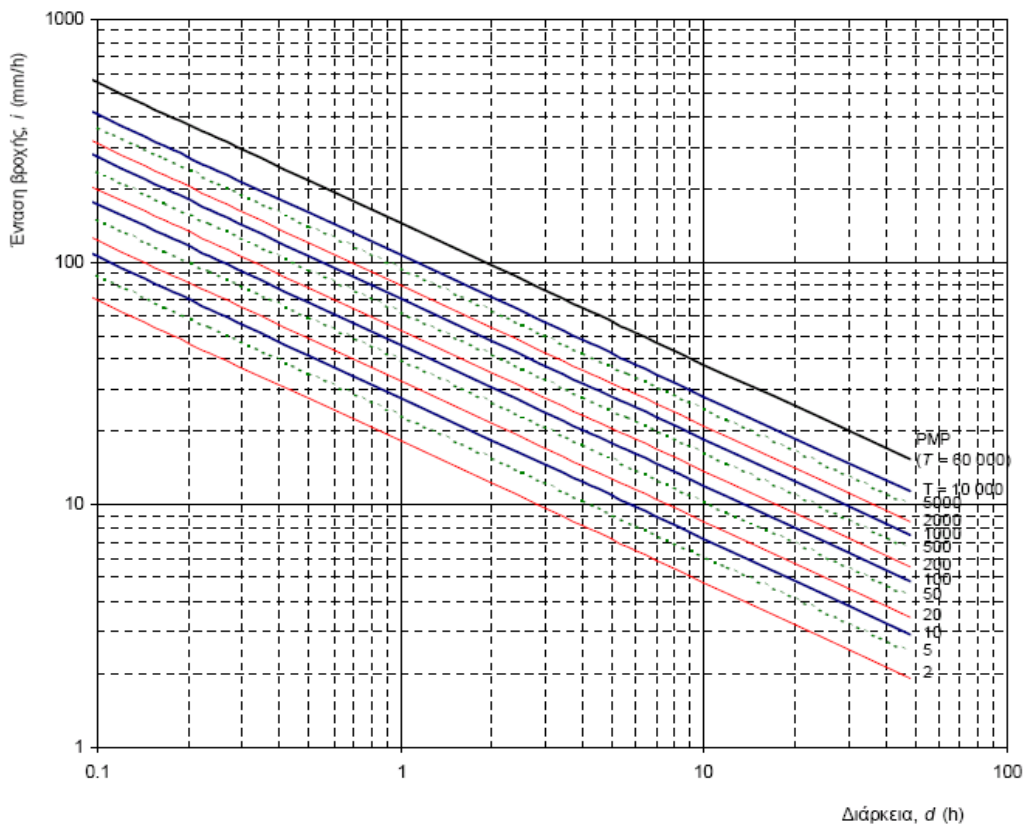
### 3.3.5 Μετεωρολογικό μοντέλο

Με τη δημιουργία του μετεωρολογικού μοντέλου επιτυγχάνεται η εισαγωγή μετεωρολογικής πληροφορίας για την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης. Εισάγονται είτε παρατηρούμενα επεισόδια βροχόπτωσης είτε υποθετικά επεισόδια βροχόπτωσης για επιλεγμένη περίοδο επαναφοράς.

Στην παρούσα εργασία, λόγω έλλειψης βροχομετρικών στοιχείων, επιλέχθηκε η εισαγωγή υποθετικών επεισοδίων βροχόπτωσης για τέσσερις διαφορετικές περιόδους επαναφοράς, με την βοήθεια των όμβριων καμπυλών, όπως αυτές προέκυψαν από παλιότερη υδρολογική μελέτη (Κουτσογιάννης, 2003). Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στο μαθηματικό μοντέλο της βροχόπτωσης και στη διαδικασία εισαγωγής της στο HEC-HMS.

#### ➤ Μαθηματικό μοντέλο της βροχόπτωσης

Όπως αναφέρθηκε, τα επεισόδια βροχής προκύπτουν με τη βοήθεια των μέσων σημειακών όμβριων καμπυλών που έχουν υπολογιστεί για την περιοχή του Σπερχειού και φαίνονται στο Σχήμα 3.18 .



Σχήμα 3.18: Σημειακές όμβριες καμπύλες για την περιοχή της Λαμίας. (ΠΗΓΗ: Κουτσογιάννης, 2003)

Η μαθηματική διατύπωση των παραπάνω σημειακών όμβριων καμπύλων είναι:

$$i(d, T) = \frac{30.87 * (T^{0.15} - 0.517)}{d^{0.58}} \quad (3.10)$$

d [h] : η διάρκεια βροχής

T [έτη] : ο χρόνος επαναφοράς

Η κατάρτιση του υετογράμματος σχεδιασμού γίνεται με τη βοήθεια της μεθόδου των εναλλασσόμενων τμηματικών υψών. Η διαδικασία που ακολουθείται αναλύεται αναλυτικά ακολούθως.

Επιλέγεται υποτιθέμενο επεισόδιο βροχής διάρκειας 48 ωρών και για περιόδους επαναφοράς T=10, T=100, T=500 και T=1000. Το χρονικό βήμα είναι ίσο με 30 min. οι εντάσεις και τα ύψη βροχής υπολογίζονται για κάθε περίοδο επαναφοράς από τις όμβριες καμπύλες, όπως αυτές περιγράφονται παραπάνω.

Οι τιμές που προκύπτουν από την εξίσωση (3.10) αφορούν στη σημειακή βροχόπτωση και πρέπει να αναχθούν στην επιφάνεια της κάθε εξεταζόμενης υπολεκάνης. Για την αναγωγή χρησιμοποιείται ο συντελεστή η ακόλουθη σχέση που δίνεται από τους Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο (1999, σ. 153):

$$\phi = 1 - \frac{0.048 * A^{0.36 - 0.01 * \ln A}}{d^{0.35}} \quad (3.11)$$

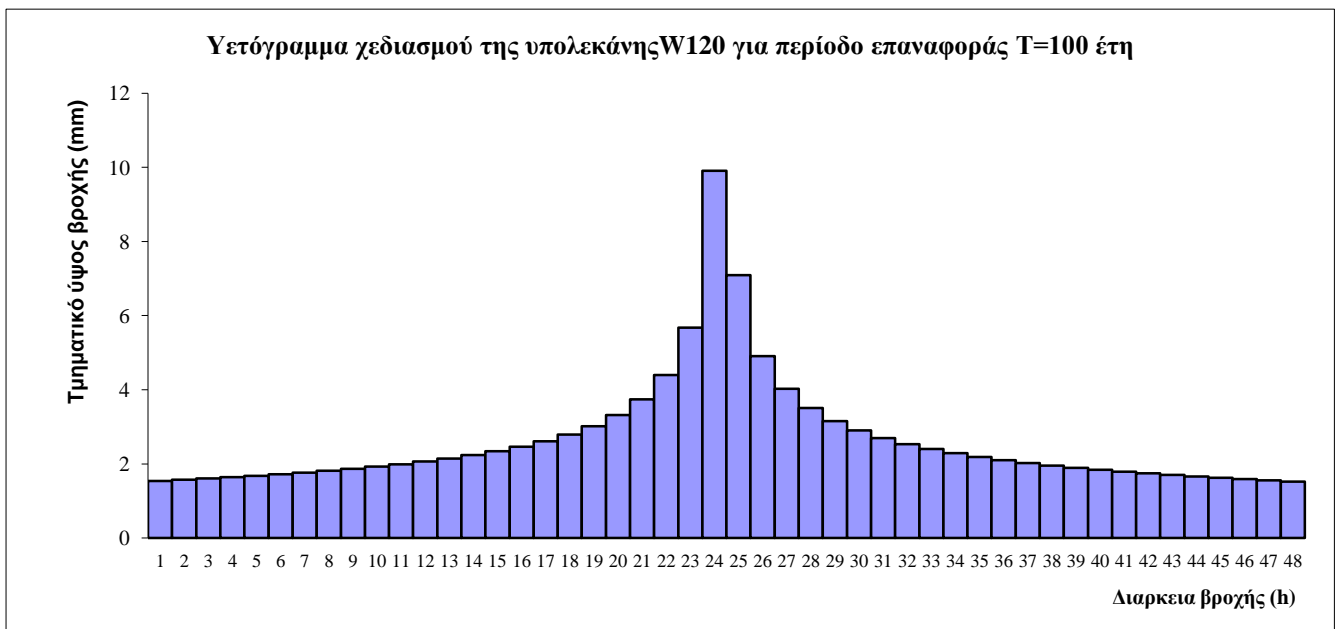
όπου

$\phi$  : ο συντελεστής επιφανειακής αναγωγής (αδιάστατος αριθμός),

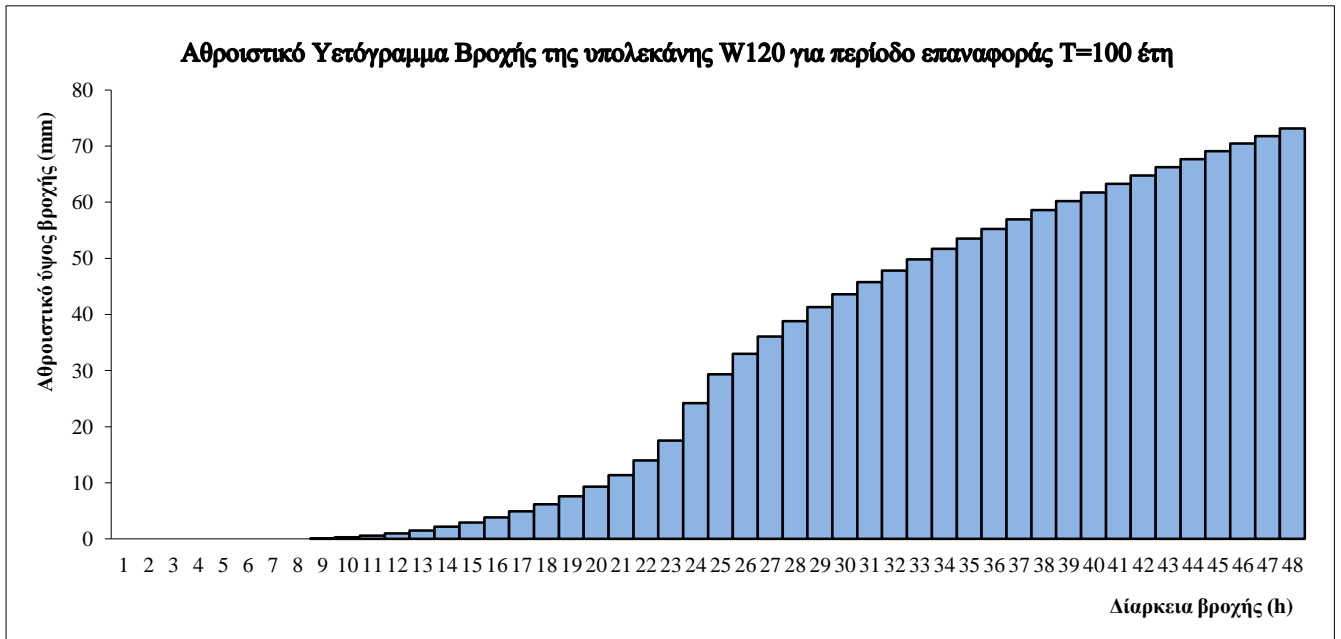
$A [km^2]$  : η έκταση της λεκάνης και

$d [h]$  : η διάρκεια βροχής

Το σημειακό ύψος βροχής πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή επιφανειακής αναγωγής  $\phi$  και προκύπτει το επιφανειακό ύψος βροχής. Υπολογίζονται τα τμηματικά ύψη και στη συνέχεια ανακατατάσσονται έτσι ώστε η μεγαλύτερη τιμή να τοποθετείται στην μέση του επεισοδίου, η αμέσως επόμενη μισή ώρα μετά, η επόμενη μισή ώρα πριν Κ.Ο. Τέλος υπολογίζεται το αθροιστικό ύψος βροχής. Στα σχήματα 3.19 και 3.20 που ακολουθούν φαίνεται το υετόγραμμα και το αθροιστικό υετόγραμμα της υπολεκάνης W120.



**Σχήμα 3.19:** Υετόγραμμα σχεδιασμού βροχής 48 h για περίοδο επαναφοράς T=100 με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ.

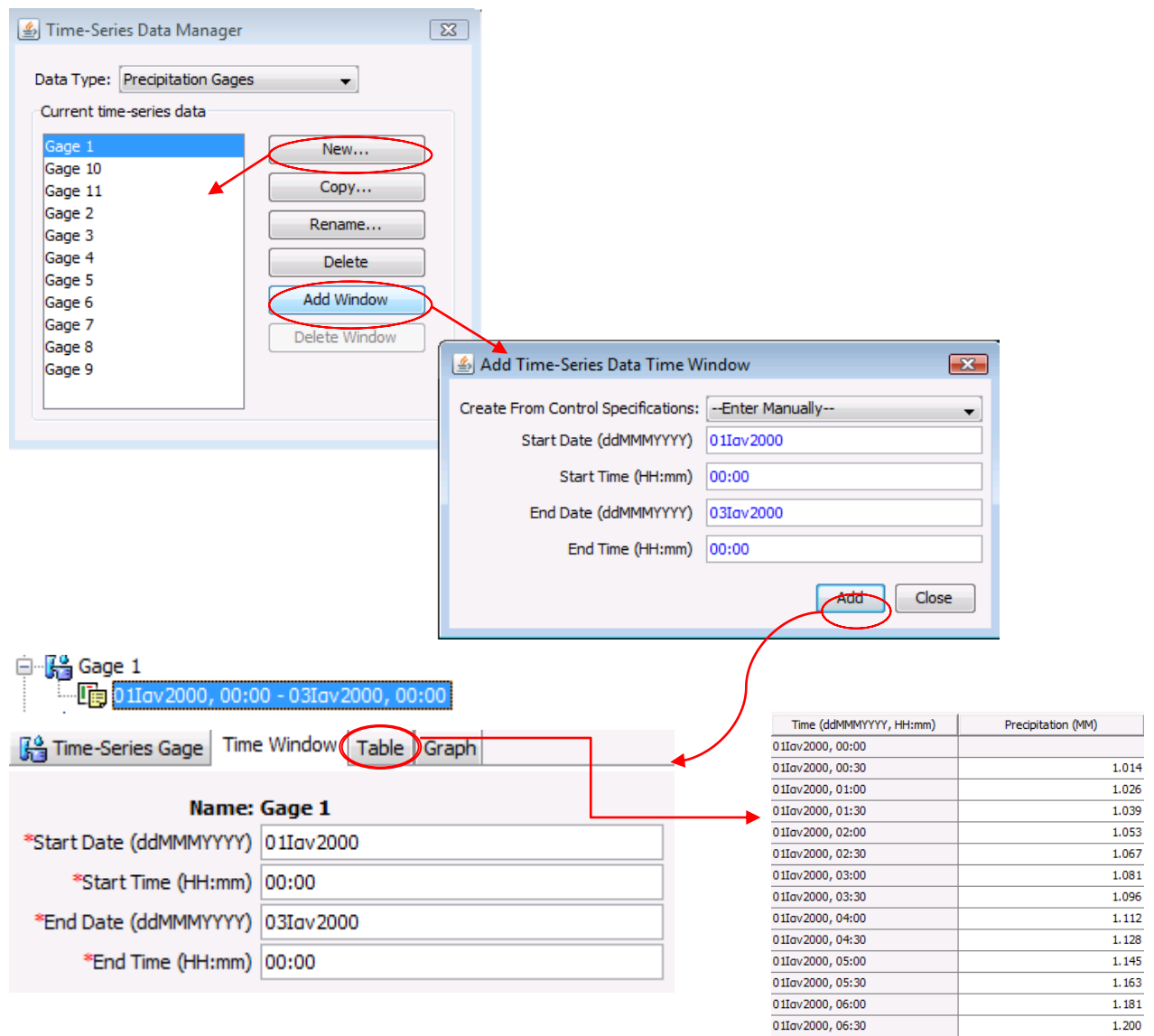


*Σχήμα 3.20: Αθροιστικό υετόγραμμα σχεδιασμού βροχής 48 h για περίοδο επαναφοράς T=100 .*

### ➤ Εισαγωγή επεισοδίων βροχής στο HEC-HMS

Υπολογίζονται, λοιπόν, τα ύψη βροχής για κάθε υπολεκάνη και για κάθε περίοδο επαναφοράς και εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω τις εντολής Components / Time-Series Data όπου εμφανίζεται ένα παράθυρο, όπως φαίνεται στην εικόνα 12, στο οποίο δημιουργούνται υπόβαθρα εισαγωγής του επεισοδίου βροχής μέσω της εντολής New για κάθε υπολεκάνη. Στη συνέχεια, με την εντολή Add Window δημιουργείται μια βάση στην οποία συμπληρώνονται ορισμένα στοιχεία, όπως το χρονικό βήμα, ο τρόπος εισαγωγής του επεισοδίου βροχής και οι μονάδες των υψών βροχής (Time-Series Gage), η διάρκεια του επεισοδίου βροχής (Time Window), οι τιμές των τμηματικών υψών βροχής που περιγράφει το επεισόδιο της βροχής (Table) και τέλος το υετόγραμμα σχεδιασμού (Graph) (Σχήμα 3.21).

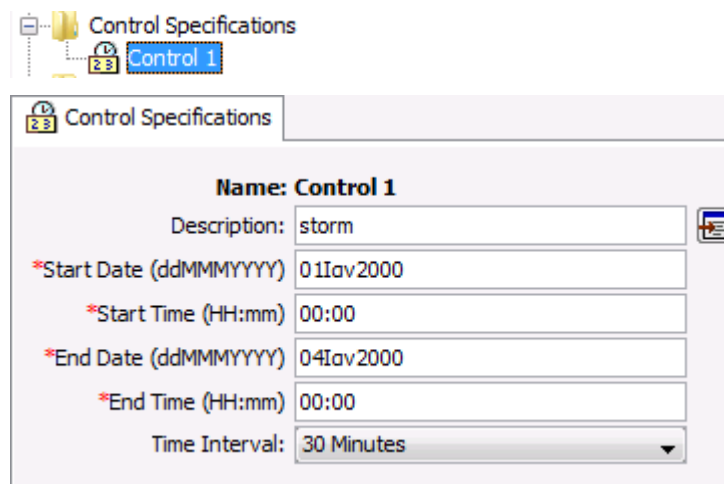




Σχήμα 3.61: Διαδικασία εισαγωγής επεισοδίου βροχής στο HEC-HMS.


### 3.4 Αρχείο προσομοίωσης




Το αρχείο της προσομοίωσης αποτελεί το τελευταίο βήμα πριν την εκτέλεση των υπολογισμών της υδρολογικής προσομοίωσης. Σε αυτό ορίζεται η χρονική διάρκεια του πλημμυρογραφήματος καθώς επίσης και το χρονικό βήμα αυτού. Η εντολή που εκτελεί αυτή την διαδικασία είναι Components → Control Specifications Manager → New → Control 1. Τα στοιχεία που συμπληρώνονται φαίνονται στο Σχήμα 3.22.

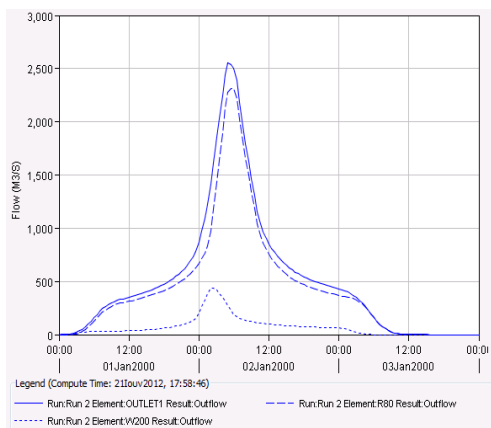


Σχήμα 3.22: Παράθυρο εισαγωγής χρονικών ορίων της υδρολογικής προσομοίωσης.

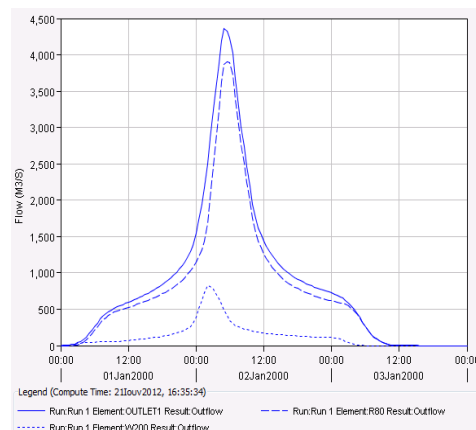
### 3.5 Εκτέλεση υπολογισμών υδρολογικής προσομοίωσης - Αποτελέσματα

Μετά την ολοκλήρωση της εισαγωγής των δεδομένων ακολουθεί η εκτέλεση του υδρολογικού μοντέλου. Ως αποτέλεσμα της υδρολογικής προσομοίωσης είναι τα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για κάθε υπολεκάνη της περιοχής μελέτης. Ο υπολογισμός αυτών καθίσταται εφικτός μέσω της εντολής Compute / Create Simulation Run / Run1, όπου επιλέγεται το μοντέλο λεκάνης απορροής, το μετεωρολογικό μοντέλο και το αρχείο προσομοιώσεων. Η διαδικασία της προσομοίωσης ολοκληρώνεται με την εντολή Compute / Select Run / Run1 ή απευθείας πατώντας τα αντιστοιχο εικονίδια (  ).

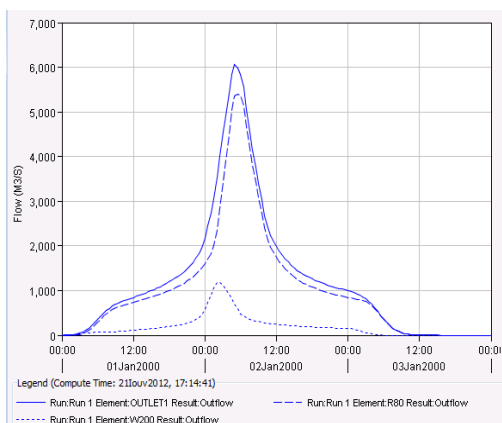
Τα αποτελέσματα εμφανίζονται είτε με την μορφή διαγραμμάτων, επιλέγοντας το ανάλογο εικονίδιο (  ) αφού έχει επιλεγεί αρχικά η υπολεκάνη προς εξέταση από το μοντέλο της λεκάνης απορροής, είτε με την μορφή πινάκων στους οποίους εμφανίζεται η βροχόπτωση, οι απώλειες και η απορροή σε μορφή χροσοσειράς (  ) είτε ως τιμές παροχών αιχμής ολικής βροχόπτωσης, ολικών απωλειών και απορροής μέσω του Summary Table (  ). Ενδεικτικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την έξοδο της υπό εξέταση λεκάνης που αντιστοιχεί στην περιοχή Κομποτάδες στο Σχήμα 3.23.



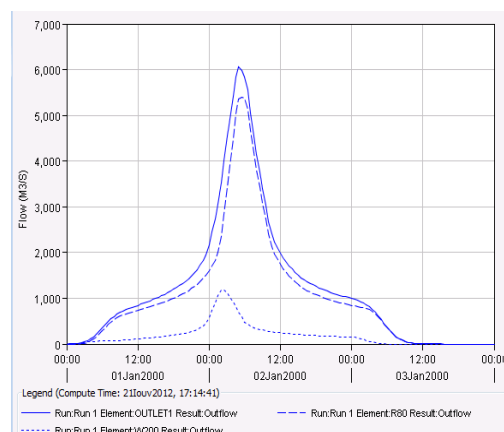
(α)



(β)



(γ)



(δ)

**Σχήμα 3.23:** Πλημμυρογράφημα σχεδιασμού ανάντη λεκάνης Σπερχειού για περίοδο επαναφοράς (α)  $T=10$  έτη, (β)  $T=100$  έτη, (γ)  $T=500$  έτη και (δ)  $T=1000$  έτη αντίστοιχα

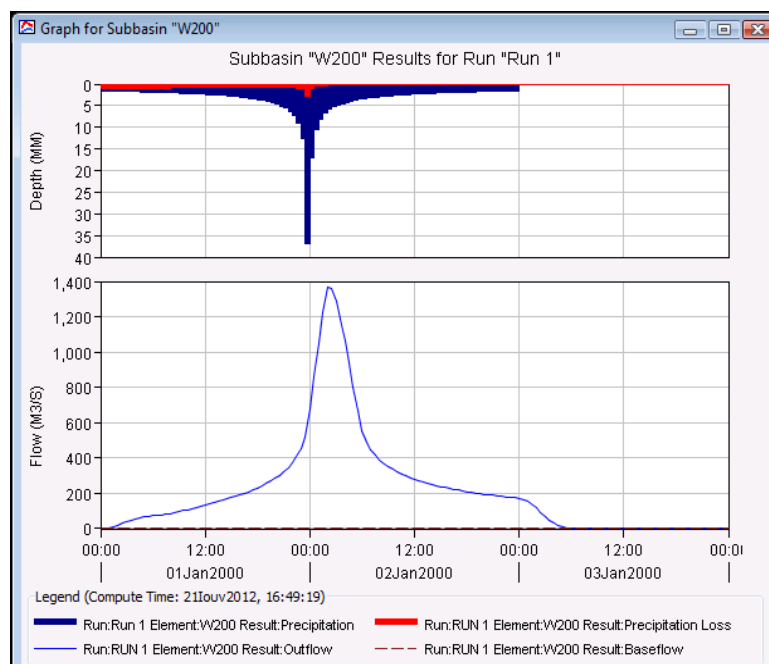
Στον Πίνακα 3.7 φαίνονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης, που είναι ο όγκος της πλημμύρας και η παροχή αιχμής αυτής, για τις τέσσερις περιόδους (10,100,500,1000) επαναφοράς που εξετάστηκαν.

Πίνακας 3.7: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης της ανάντη Σπερχειού με τη βοήθεια το HEC-HMS

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	T=10	T=100	T=500	T=1000
Παροχή αιχμής ( $m^3/s$ )	2551.6	4361.3	6057.4	7138.7
Όγκος πλημμύρας ( $10^6 m^3$ )	134.10	229.12	319.00	361.27

Ωστόσο, δίνεται η δυνατότητα επισκόπησης των αποτελεσμάτων της υδρολογικής προσομοίωσης για κάθε υπολεκάνη αλλά και για κάθε τμήμα ποταμού. Στο Σχήμα 3.24 φαίνεται ενδεικτικά το πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για την

υπολεκάνη W200 με το νετόγραμμα σχεδιασμού με τις απώλειες για περίοδο επαναφοράς  $T=500$  έτη.



*Σχήμα 3.24: Το πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για την υπολεκάνη W200 με το νετόγραμμα σχεδιασμού με τις απώλειες για περίοδο επαναφοράς  $T=500$  έτη.*

Λόγω έλλειψης δεδομένων παροχής στην περιοχή μελέτης τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης που προκύπτουν από το HEC-HMS, ελέγχονται με αυτά που προέκυψαν από παλαιότερη υδρολογική μελέτη (Κουτσογιάννης, 2003). Παρατηρείται, λοιπόν, υπερεκτίμηση των υπολογισμένων πλημμυρικών όγκων και των παροχών αιχμής συγκριτικά με αντίστοιχα αποτελέσματα της υδρολογικής μελέτης. Θεωρήθηκε, έτσι, σκόπιμο να γίνει βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου ως προς τις παραμέτρους αυτού.

### **3.6 Βαθμονόμηση υδρολογικού μοντέλου**

Η βαθμονόμηση γίνεται με σκοπό την επίτευξη επιθυμητών αποτελεσμάτων, τα οποία θα συγκλίνουν με τα συγκριτικά αποτελέσματα της υδρολογικής μελέτης, όπως προαναφέρθηκε. Η βαθμονόμηση γίνεται με την αλλαγή των τιμών ορισμένων παραμέτρων. Οι παράμετροι οι οποίες επιλέχθηκαν να βαθμονομηθούν είναι ο συντελεστής CN και η μέθοδος διόδευσης πλημμύρας που χρησιμοποιείται για την υδρολογική προσομοίωση.

### 3.6.1 Μείωση του συντελεστή CN κατά 15%

Το πρώτο σενάριο που εξετάζεται είναι η μείωση του συντελεστή CN, με αποτέλεσμα την αύξηση της διαπερατότητας του εδάφους. Έτσι, αυξάνονται οι απώλειες και μειώνεται ο όγκος απορροής τη πλημμύρας. Στον παρακάτω πίνακα 3.8 φαίνονται οι νέες τιμές του CN για κάθε υπολεκάνη.

Πίνακας 3.8: Τιμές παραμέτρου CN για κάθε υπολεκάνη μειωμένες κατά 15%.

ΛΕΚΑΝΗ	CN
W120	80
W130	67
W140	71
W150	70
W160	81
W170	69
W180	78
W190	65
W200	65
W210	78
W220	60

Όλα τα υπόλοιπα δεδομένα της υδρολογικής προσομοίωσης διατηρούνται. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του μοντέλου φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.9.

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης στην έξοδο της λεκάνης με μείωση του CN κατά 15%.

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	T=10	T=100	T=500	T=1000
Όγκος πλημμύρας ( $10^6 \text{ m}^3$ )	127.851	220.232	308.51	350.183
Παροχή αιχμής ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	2418.9	4185.9	5873.9	6968.1

Δεν παρατηρείται μεγάλη μείωση στις παροχές αιχμής και τους πλημμυρικούς όγκος της λεκάνης ανάντη του Σπερχειού. Η διαφορά των αποτελεσμάτων από τα

αντίστοιχα της υδρολογικής μελέτης που λήφθηκε υπόψη είναι αρκετά μεγάλη (Κουτσογιάννης, 2003). Επομένως απαιτείται περαιτέρω μείωση των τιμών του συντελεστή CN.

### 3.6.2 Μείωση του συντελεστή CN κατά 30%

Σε αυτό το σενάριο μειώνεται ο συντελεστής CN κατά 30% σε όλες τις υπολεκάνες, ενώ τα υπόλοιπα δεδομένα της υδρολογικής προσομοίωσης διατηρούνται ως έχουν. Οι τιμές του CN που προκύπτουν φαίνονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.10.

Πίνακας 3.10: Τιμές παραμέτρου CN για κάθε υπολεκάνη μειωμένες κατά 30%.

ΛΕΚΑΝΗ	CN
W120	58
W130	55
W140	58
W150	57
W160	59
W170	57
W180	57
W190	53
W200	53
W210	57
W220	50

Εισάγονται οι τιμές στο πρόγραμμα και ολοκληρώνεται η διαδικασία της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 3.11.

Πίνακας 3.11: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης στην έξοδο της λεκάνης με μείωση του CN κατά 30%.

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	T=10	T=100	T=500	T=1000
Παροχή αιχμής (m <sup>3</sup> /s)	2296.8	3995.2	5514	6755
Όγκος πλημμύρας (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	122.325	211.0366	290.6869	337.4767

Παρατηρείται μείωση της παροχής αιχμής και των όγκων πλημμύρας με την μείωση του CN κατά 30%. Ωστόσο, οι τιμές παραμένουν αρκετά υψηλές με αποτέλεσμα να μην κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού.

### 3.6.3 Μείωση του συντελεστή CN κατά 30% και αλλαγή προτύπου διόδευσης – Χρήση μέθοδος Muskingum.

Στο σενάριο αυτό γίνεται διατήρηση των μειωμένων κατά 30% τιμών του CN (Πίνακας 10) και αλλαγή της μεθόδου διόδευσης. Έτσι, χρησιμοποιείται η μέθοδος Muskingum.

#### ➤ Μέθοδος Muskingum

Η μέθοδος Muskingum ανήκει στην κατηγορία της υδρολογικής διόδευσης πλημμύρας. Χρησιμοποιεί την απλοποιημένη εξίσωση συνέχειας σε ένα τμήμα του ποταμού (McCarthy, 1938)

$$I - Q = \frac{dS}{dt} \quad (3.12)$$

Όπου

I = η εισροή στο τμήμα του ποταμού

Q = η εκροή

S = η αποθήκευση στο τμήμα του ποταμού

t = ο χρόνος

Επομένως, η διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής σε διάστημα dt είναι ίση με τη μεταβολή της αποθήκευσης στο τμήμα για το αντίστοιχο διάστημα dt.

Η σχέση αποθήκευσης με την εισροή και την εκροή εκφράζεται μετά από απλοποίησης με μια γραμμική σχέση (Τσακίρης, 1995):

$$S = K [xI + (1 - x)Q] \quad (3.13)$$

όπου

$x$  : το βάρος συμμετοχής της εισροής (και  $1-x$  το βάρος συμμετοχής της εκροής) στην αποθήκευση του τμήματος του ποταμού. Το  $x$  παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1.

$K$  : σταθερά που προσεγγίζεται από τον μέσο χρόνο διαδρομής της αιχμής της πλημμύρας διαμέσου του τμήματος του ποταμού.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων  $K$  και  $x$  της μεθόδου χρησιμοποιούνται δύο κατηγορίες μεθόδων. Οι μέθοδοι της πρώτης κατηγορίας είναι ημιεμπειρικές και περιλαμβάνουν είτε δοκιμαστικές επαναλήψεις με επιλογή τιμών του  $x$  και γραφική εκτίμηση της τιμής του  $K$ , είτε άμεση γραφική εκτίμηση των  $x$  και  $K$ . Οι μέθοδοι της δεύτερης κατηγορίας στηρίζονται στη θεωρία ανάλυσης χρονοσειρών.

Όταν δεν υπάρχουν μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές σχέσεις για την εκτίμηση των παραμέτρων της μεθόδου. Έτσι, η παράμετρος  $K$  μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση (Κουτσογιάνης, 1999):

$$K = \frac{L}{V} = \frac{L * A}{Q} \quad (3.14)$$

όπου

$L$  : το μήκος από την είσοδο μέχρι την έξοδο του υπό μελέτη τμήματος

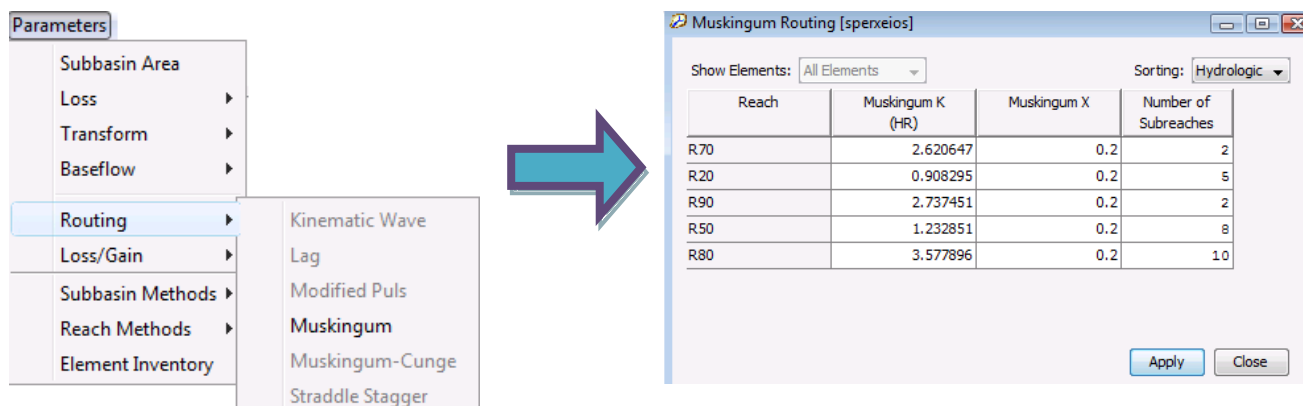
$Q, V, A$  : αναφέρονται σε συνθήκες μόνιμης ροής με τη μέση παροχή του πλημμυρικού επεισοδίου.

#### ➤ Εισαγωγή προτύπου διόδευσης στο υδρολογικό μοντέλο

Εφαρμόζεται η μέθοδος Muskingum στα τμήματα του ποταμού του υδρολογικού μοντέλου. Λόγω έλλειψης μετρήσεων παροχής στην περιοχή, για την εκτίμηση της τιμής του  $K$  χρησιμοποιείται η σχέση (3.13). Η παράμετρος  $x$  συχνά επιλέγεται ίση με 0.2, όπως έγινε και στην παρούσα μελέτη (Κουτσογιάνης, 1999). Επίσης, η ταχύτητα του νερού επιλέχθηκε ίση με 1.2 m/s. Έτσι, υπολογίζονται οι τιμές των παραμέτρων της μεθόδου.



Η μέθοδος διόδευσης εισάγεται στο μοντέλο μέσω της εντολής Parameters / Routing / Muskingum και συμπληρώνονται οι τιμές των παραμέτρων της μεθόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.24.



**Σχήμα 3.24:** Εισαγωγή παραμέτρων της μεθόδου διόδευσης Muskingum στο HEC-HMS.

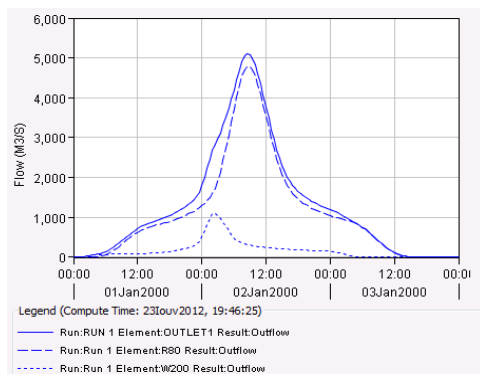
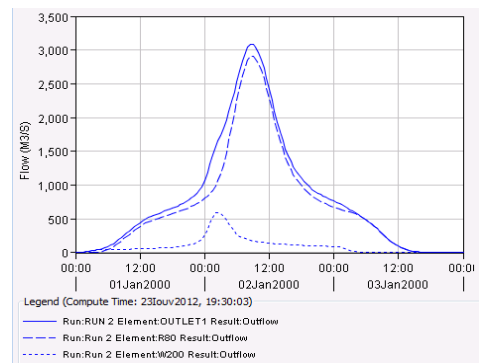
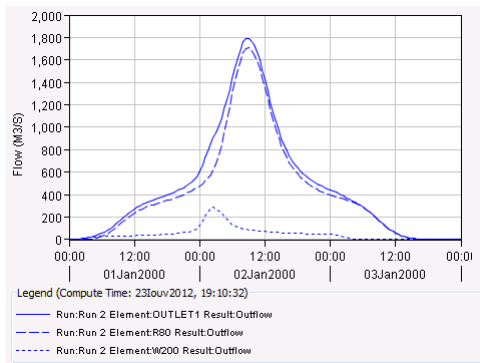
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.24, εκτός από τις παραμέτρους της μεθόδου ζητείται από το πρόγραμμα και ο αριθμός των παραποτάμων ανάντη της εισόδου του κάθε τμήματος του ποταμού.

Αφού, αλλαχθούν οι τιμές του CN για κάθε υπολεκάνη του υδρολογικού μοντέλου και η επιλεχθεί η Muskingum για μέθοδο διόδευσης εκτελούνται οι υπολογισμοί της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης γι' αυτό το σενάριο φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.12: Αποτελέσματα υδρολογικής προσομοίωσης με μείωση των τιμών του CN κατά 30% και χρήση της μεθόδου διόδευσης Muskingum.

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	T=10	T=100	T=500	T=1000
Όγκος πλημμύρας ( $10^6 \text{ m}^3$ )	122.325	210.864	290.857	337.477
Παροχή αιχμής ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	1793.7	3089.9	4247.6	5113.1

Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού είναι αρκετά ικανοποιητικά. Τόσο ο όγκος της πλημμύρας όσο και η παροχή αιχμής πλησιάζουν στις αντίστοιχες τιμές παλιότερης υδρολογικής μελέτης (Κουτσογιάννης, 2003). Επομένως, οι τιμές αυτές τις χρησιμοποιηθούν στην υδραυλική προσομοίωση που θα ακολουθήσει. Στο Σχήμα 3.25 φαίνονται και τα τελικά πλημμυρογραφήματα στην έξοδο της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.



*Σχήμα 3.25: Πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για την ανάντη λεκάνη του Σπερχειού για περιόδους επαναφοράς  $T=100$ ,  $T=500$  και  $T=1000$  έτη αντίστοιχα.*

## **4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΣΠΕΡΧΕΙΟΥ**

### **4.1 Εισαγωγή**

Η υδραυλική προσομοίωση της περιοχής μελέτης επιτυγχάνεται με την χρήση των προγραμμάτων HEC-GeoRAS και HEC-RAS. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι ο υπολογισμός των πιεζομετρικών βαθών και των γραμμών ενέργειας και κατ' επέκταση η δημιουργία χαρτών πλημμυρικών κατακλύσεων.

Αναλυτικότερα, το πρόγραμμα HEC-GeoRAS χρησιμοποιείται για την δημιουργία αρχείων εισόδου για την προσομοίωση. Ουσιαστικά προεπεξεργάζεται τα αρχικά δεδομένα με σκοπό την εξαγωγή του κατάλληλου γεωμετρικού μοντέλου. Ως αρχικό δεδομένο εισάγεται το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της υπό εξέτασης λεκάνης απορροής του ποταμού Σπερχειού.

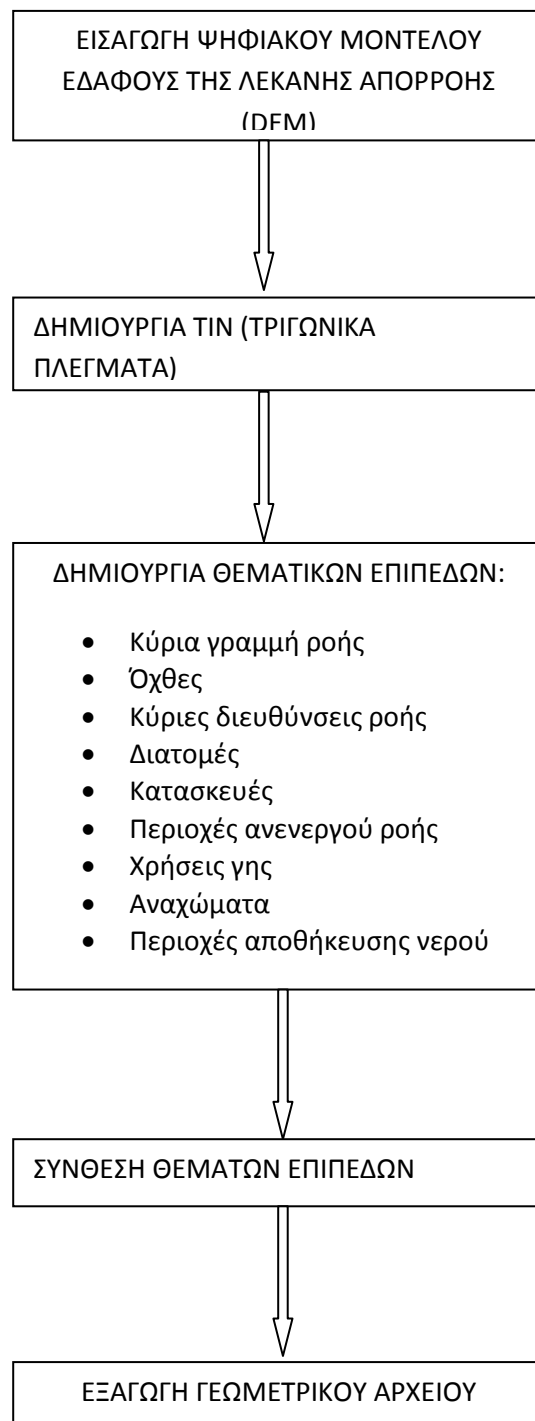
Εν συνεχεία, τα γεωμετρικό μοντέλο που προήλθε από την προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων εισάγεται στο HEC-RAS. Με την βοήθεια του υδρολογικού αρχείου, που προέκυψε από την υδρολογική προσομοίωση, υπολογίζονται τα πιεζομετρία βάθη και οι γραμμές ενέργειας κατά μήκος του ποταμού.

Με την χρήση των παραπάνω δεδομένων και με την βοήθεια του ψηφιακού μοντέλου εδάφους της περιοχής προκύπτουν οι χάρτες κατάκλυσης. Παράγωγο προϊόν των χαρτών κατάκλυσης αποτελούν οι χάρτες κινδύνου με την χρήση του χάρτη χρήσης γης.

### **4.2 Δημιουργία γεωμετρικού αρχείου**

Το γεωμετρικό αρχείο αποτελεί αρχείο εισόδου για την υδραυλική προσομοίωση του ποταμού. Περιλαμβάνει την οριζοντιογραφία της περιοχής μελέτης, την μηκοτομή του τμήματος του Σπερχειού που έχει επιλεγεί και έναν αριθμό διατομών σε καθορισμένες θέσεις. Η δημιουργία αυτού του αρχείου αποτελεί ουσιαστικά προϊόν μιας διαδικασίας που ολοκληρώνεται με την βοήθεια του HEC-GeoRAS, το οποίο αποτελεί μια εργαλειοθήκη του περιβάλλοντος ArcMap.

Η διαδικασία η οποία ακολουθείται παρουσιάζεται σχηματικά στο παρακάτω Σχήμα 4.1.



*Σχήμα 4.1: Διάγραμμα της διαδικασίας του HEC-GeoRAS*

#### **4.2.1 Δημιουργία TIN**

Τα τριγωνικά πλέγματα TIN αποτελούν γεωγραφικά και αποτελούν μια τρισδιάστατη απεικόνιση του αναγλύφου. Η όλη διαδικασία της δημιουργία του TIN

αφορά την δημιουργία του πλέγματος των τριγώνων και τον καθορισμό της συνάρτησης της χωρικής διαφοροποίησης των τιμών. Ένα σύνολο σημείων μπορεί να τριγωνοποιηθεί συνδέοντας κάθε σημείο με όλα τα γειτονικά που είναι πλησιέστερα σε αυτό με ευθύγραμμα τμήματα που δεν τέμνονται μεταξύ τους. Το σύνολο των τριγώνων προβάλλεται σε ένα σύστημα επικλινών επιπέδων τα οποία απεικονίζουν τις εκτιμηθείσες επιφάνειες με βάση την γραμμική συνάρτηση. Δεδομένου ότι οι τιμές σε κάθε κορυφή της εκτιμηθείσας επιφάνειας είναι γνωστές, με χρήση απλής γεωμετρίας η τιμή κάθε σημείου μπορεί χωρίς πρόβλημα να εκτιμηθεί.

Για την δημιουργία αυτών απαιτείται η χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM). Με τη εντολή Convert / Raster to TIN, της εργαλειοθήκης 3D Analyst του ArcMap, και αφού επιλεγεί το αρχείο εισόδου που είναι το DEM και η ισοδιάσταση υψομέτρων παράγεται το TIN. Η ισοδιάσταση που επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία είναι 10 m. Το τελικό προϊόν της παραπάνω διαδικασίας φαίνεται στο Χάρτη 4.1.



*Χάρτης 4.1: Απεικόνιση του TIN της ανάγνη λεκάνης του Σπερχειού*

#### **4.2.2 Δημιουργία θεματικών επιπέδων**

Απαραίτητα δεδομένα για την υδραυλική προσομοίωση του ποταμού αποτελούν η γεωμετρία αυτού καθώς και της περιοχής μελέτης. Για το σκοπό αυτό δημιουργούνται πέντε διαφορετικά θεματικά επίπεδα που περιέχουν τις εξής πληροφορίες:

- Κύρια γραμμή ροής ποταμού

- Όχθες ποταμού
- Κύριες διευθύνσεις ροής
- Διατομές ποταμού
- Χρήσεις γης

Ωστόσο υπάρχουν και ορισμένα επιπλέον προαιρετικά επίπεδα που η δημιουργία τους εξαρτάται από την περιοχή μελέτης. Αυτά είναι τα εξής:

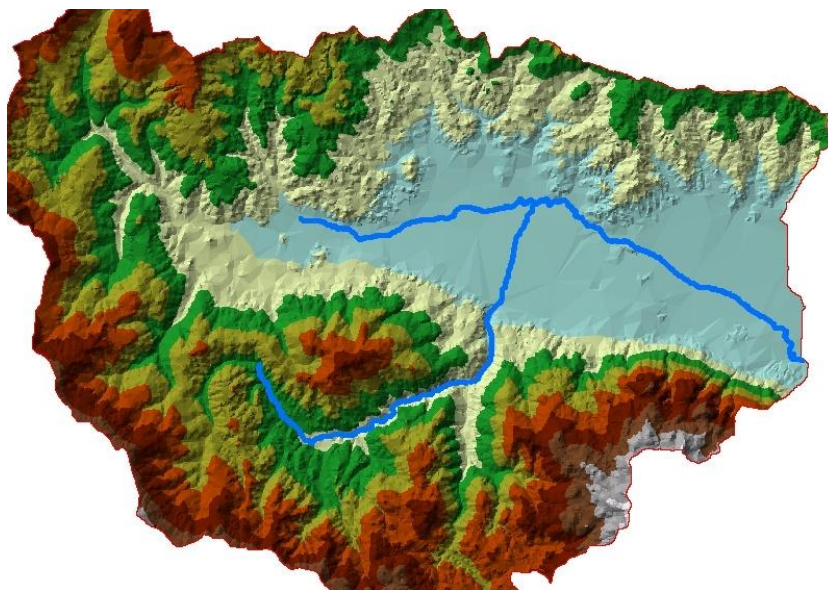
- Κατασκευές
- Περιοχές ανενεργού ροής
- Αναχώματα
- Περιοχές αποθήκευσης νερού

Στην ανάντη περιοχή του Σπερχειού που μελετάται δεν θεωρήθηκε αναγκαίο να δημιουργηθούν αυτά τα θεματικά επίπεδα αφού δεν υπήρχαν αντίστοιχα στοιχεία στην περιοχή.

Η δημιουργία αυτών επιτυγχάνεται μέσω της εντολής RAS Geometry / Create RAS Layers όπου δημιουργείται μια κενή βάση για καθένα από τα παραπάνω θεματικά επίπεδα.

### ***Κύρια γραμμή ροής***

Για την δημιουργία της κύριας γραμμής ροής του ποταμού εισάγεται το υδρογραφικό δίκτυο, όπως προέκυψε από την διαδικασία της προεπεξεργασίας των δεδομένων στο HEC-GeoHMS. Ψηφιοποιείται η κύρια γραμμή ροής που έχει επιλεγεί για την υδραυλική προσομοίωση. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν οι τρεις κύριοι κλάδοι για περαιτέρω επεξεργασία όπως απεικονίζονται στο Χάρτη 4.2. Η ψηφιοποίηση γίνεται κατά την φορά της ροής.

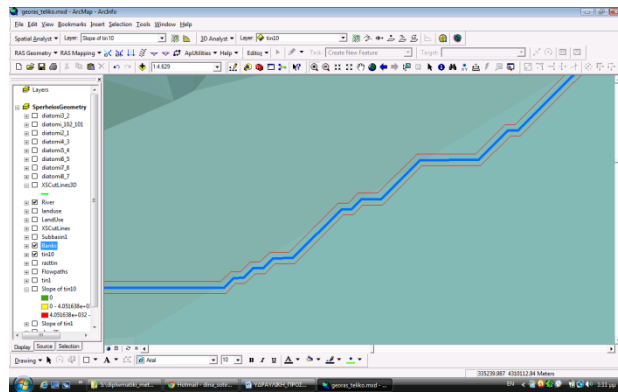


*Χάρτης 4.2: Απεικόνιση των κύριων κλάδων για επιλέχθηκαν για την υδραυλική προσομοίωση*

Η βάση του συγκεκριμένου θεματικού επιπέδου περιέχει ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να υπολογιστούν και να συμπληρωθούν. Αυτό γίνεται μέσω της εντολής RAS Geometry / Stream Centerline Attributes / All όπου ελέγχεται η σύνδεση και ο προσανατολισμός των τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου (**Topology**), υπολογίζεται το μήκος των κύριων γραμμών ροής που επιλέχθηκαν και καθορίζεται η φορά της ροής (**Leghts / Stations**) και τέλος δημιουργεί μια τρσδιαστατη μορφή του ποταμού μέσω της αξιοποίησης της πληροφορίας που δίνεται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (**Elevations**).

### **Όχθες**

Εν συνεχεία, σχεδιάζονται οι όχθες του ποταμού. Η δημιουργία των οχθών δεν είναι υποχρεωτική αλλά διευκολύνει την διαδικασία της υδραυλικής προσομοίωσης στο HEC-RAS. Οι όχθες σχεδιάζονται εκατέρωθεν του ποταμού με τεθλασμένες γραμμές και ουσιαστικά οριοθετούν την κοίτη του ποταμού. Οι γραμμές που συμβολίζουν τις όχθες δεν είναι απαραίτητο να είναι συνεχείς στις περιοχές των συμβολών, δεν σχεδιάζονται με συγκεκριμένη διεύθυνση και πρέπει κατά την ψηφιοποίηση αυτών να λαμβάνονται υπόψη οι υψομετρικές πληροφορίες που δίνονται μέσω του TIN. Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται ένα τμήμα του ποταμού με τις όχθες εκατέρωθεν αυτού.



*Σχήμα 4.2: Τμήμα ποταμού Σπερχειού με σχεδιασμένες εκατέρωθεν τις όχθες αυτού.*

## **Διατομές**

Η κατασκευή των διατομών αποτελούν μια υποχρεωτική διαδικασία για την εξαγωγή αρχείων εισόδου της υδραυλικής προσομοίωσης. αυτές πρέπει να συμπεριλαμβάνουν τις όχθες και να καλύπτουν όλο το μήκος της κατάκλισης.

Οι διατομές σχεδιάζονται κάθετα στη ροή του ποταμού σε αντιπροσωπευτικές θέσεις. Θα πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον 2 διατομές ανά παραπόταμο, στην είσοδο και την έξοδο αυτού και κοντά στις συμβολές. Οι διατομές δεν θα πρέπει να τέμνονται μεταξύ τους ούτε να τέμνουν δύο φορές τον ποταμό. Η φορά σχεδίασης είναι από τα αριστερά προς τα δεξιά.

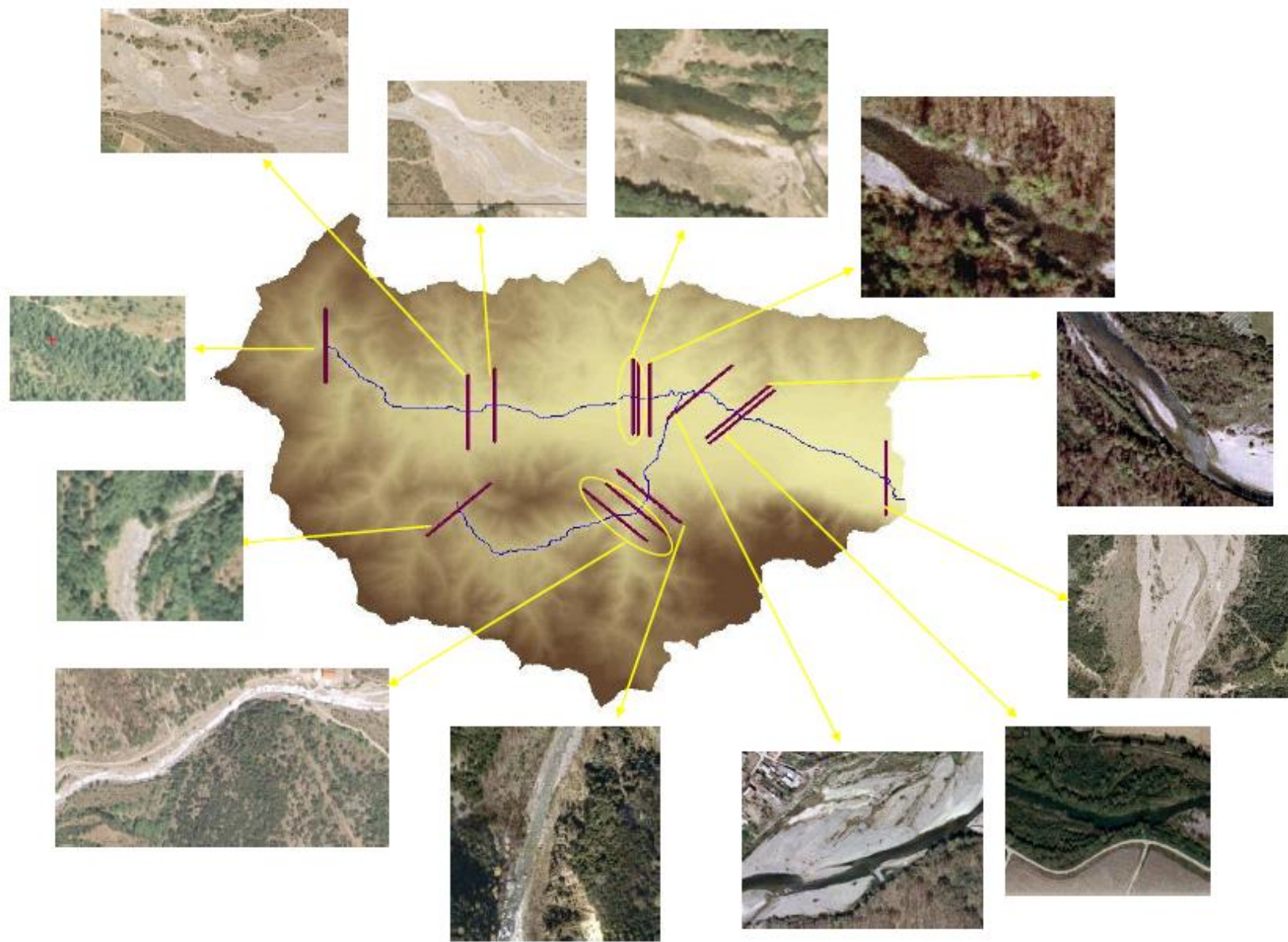
Η κατασκευή αυτών επιτυγχάνεται με τη χρήση του εργαλείου Construct Cut Lines της εργαλειοθήκης του HEC-GeoRAS. Σε αυτή ζητείται να καθοριστεί το πλάτος της διατομής και η απόσταση αυτών. Αρχικά επιλέχθηκε πλάτος διατομής ίσο με 6000 m και απόσταση μεταξύ τους ίση με 2000 m. Έγινε επιλογή διατομών και μετακίνηση όπου θεωρήθηκε αναγκαίο μέσω της εργαλειοθήκης του Editor. Οι θέσεις προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη τις προϋποθέσεις που αναφέρονται παραπάνω. Ο τελικός αριθμός των διατομών είναι 14 και οι θέσεις αυτών φαίνονται στον Χάρτη 4.3.

Αφού σχεδιαστούν οι διατομές προσδιορίζονται ορισμένα χαρακτηριστικά αυτών. Αρχικά προσδιορίζεται το όνομα και το τμήμα του ποταμού στο οποίο βρίσκεται η διατομή. Τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται από τον πίνακα της κύριας γραμμής ροής. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η απόσταση της κάθε διατομής από το πλέον κατάντη σημείο του τμήματος του ποταμού που ανήκει (River / Reach Names). Επίσης, υπολογίζεται η απόσταση της διατομής από την αριστερή και δεξιά όχθη



(Bank Stations) και καθορίζεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών κατά την διεύθυνση της ροής (Downstream Reach Lengths). Τέλος, υπολογίζονται τα υψόμετρα για διάφορα σημεία της διατομής με την βοήθεια του TIN με αποτέλεσμα να μετατρέπει τις διατομές από διδιάστατες σε τρισδιάστατες (Elevations).

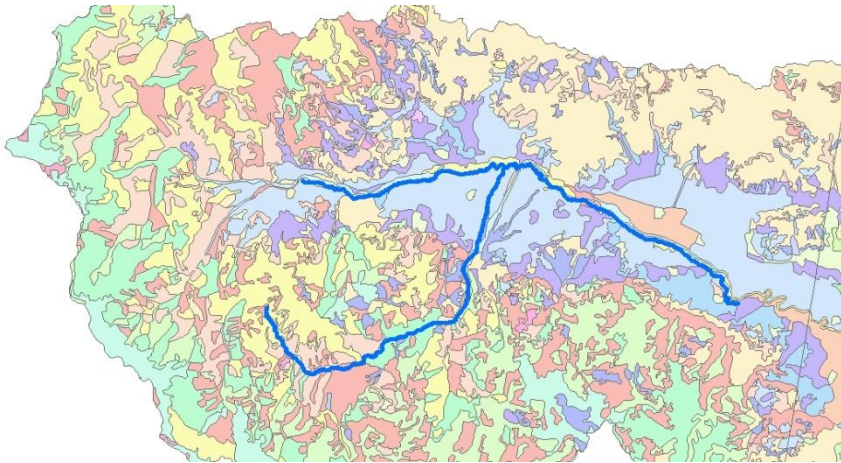
Δίνεται η δυνατότητα για επισκόπηση της διατομής με την βοήθεια του εργαλείου XS Plot, όπου ελέγχεται αν αποτυπώνεται το πλήρες πλημμυρικό πεδίο στη θέση αυτή. Έτσι, λοιπόν, επιλέγονται οι θέσεις των διατομών ώστε να είναι πιο αντιπροσωπευτικές για την υδραυλική προσομοίωση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτής.



Χάρτης 4.3: Διατομές κατά μήκος Σπερχειού και η φωτογραφική τους απεικόνιση (ΠΗΓΗ ΕΙΚΟΝΩΝ: [www.ktimatologio.gr](http://www.ktimatologio.gr))

## Χρήσεις γης

Σε κάθε θέση της διατομής προσδιορίζεται ο συντελεστής  $n$  του Manning. Ο συντελεστής  $n$  υπολογίζεται με την βοήθεια του χάρτη των χρήσεων γης. Για το λόγο αυτό δημιουργείται ένα θεματικό επίπεδο (landuse) το οποίο περιέχει πολύγωνα χρήσεων γης, όπως φαίνεται και στο Χάρτη 4.4.



Χάρτης 4.4: Χρήσεις γης.

Η αντίστοιχη τιμή του  $n$  για κάθε πολύγωνο εκτιμάται από τον παρακάτω Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.13: Εκτίμηση του συντελεστή  $n$  του Manning σύμφωνα με τα πολύγωνα χρήσεων γης (Γκιόκας, 2009).

LUCode	N_Value	Description
122	0.15	Road and rail networks and associated land
243	0.135	agriculture, significant natural vegetation
211	0.04	Non-irrigated arable land
242	0.145	Complex cultivation patterns
324	0.03	Transitional woodland-shrub
331	0.125	Beaches, dunes, sands
311	0.04	Broad-leaved forest
321	0.142	Natural grasslands
312	0.145	Coniferous forest
131	0.02	Mineral extraction sites
133	0.02	Construction sites
323	0.145	Sclerophyllous vegetation

Ο συντελεστής  $n$  υπολογίζεται για τρία τμήματα του ποταμού, επί της μισγάγγειας, αριστερά και δεξιά αυτής. Αυτό γίνεται μέσω της εντολής RAS Geometry / Manning N values / Create LU Manning table όπου δημιουργείται ένας

πίνακας που περιέχει τον συντελεστή  $n$  για κάθε πολύγωνο χρήσεων γης. Εν συνεχεία, μέσω της εντολής RAS Geometry / Manning N values / Extract N values όπου προσδιορίζονται οι τιμές του συντελεστή  $n$  για κάθε διατομή.

Ωστόσο, αυτή η διαδικασία δεν κατέστη εφικτή. Οι τιμές του συντελεστή  $n$  υπολογίζονται χειροκίνητα με την χρήση του χάρτη των χρήσεων γης και με την βοήθεια του παραπάνω Πίνακα 4.1. Αναλυτικότερα, εξετάζεται ποια πολύγωνα τέμνει κάθε τμήμα της διατομής και αποδίδεται ο μέσος όρος της τιμής του συντελεστή  $n$  των πολυγώνων αυτών.

#### **4.2.3 Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου**

Η προεπεξεργασία των δεδομένων ολοκληρώνεται με την σύνθεση των παραπάνω θεματικών επιπέδων. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή RAS Geometry / layer setup και ακολουθεί η εξαγωγή του γεωμετρικού αρχείου μέσω της εντολής RAS Geometry / Extract GIS data. Το γεωμετρικό αρχείο αποτελεί ουσιαστικά το αρχείο εισόδου για την υδραυλική προσομοίωση του ποταμού Σπερχειού.

#### **4.3 Υδραυλική προσομοίωση του ποταμού Σπερχειού**

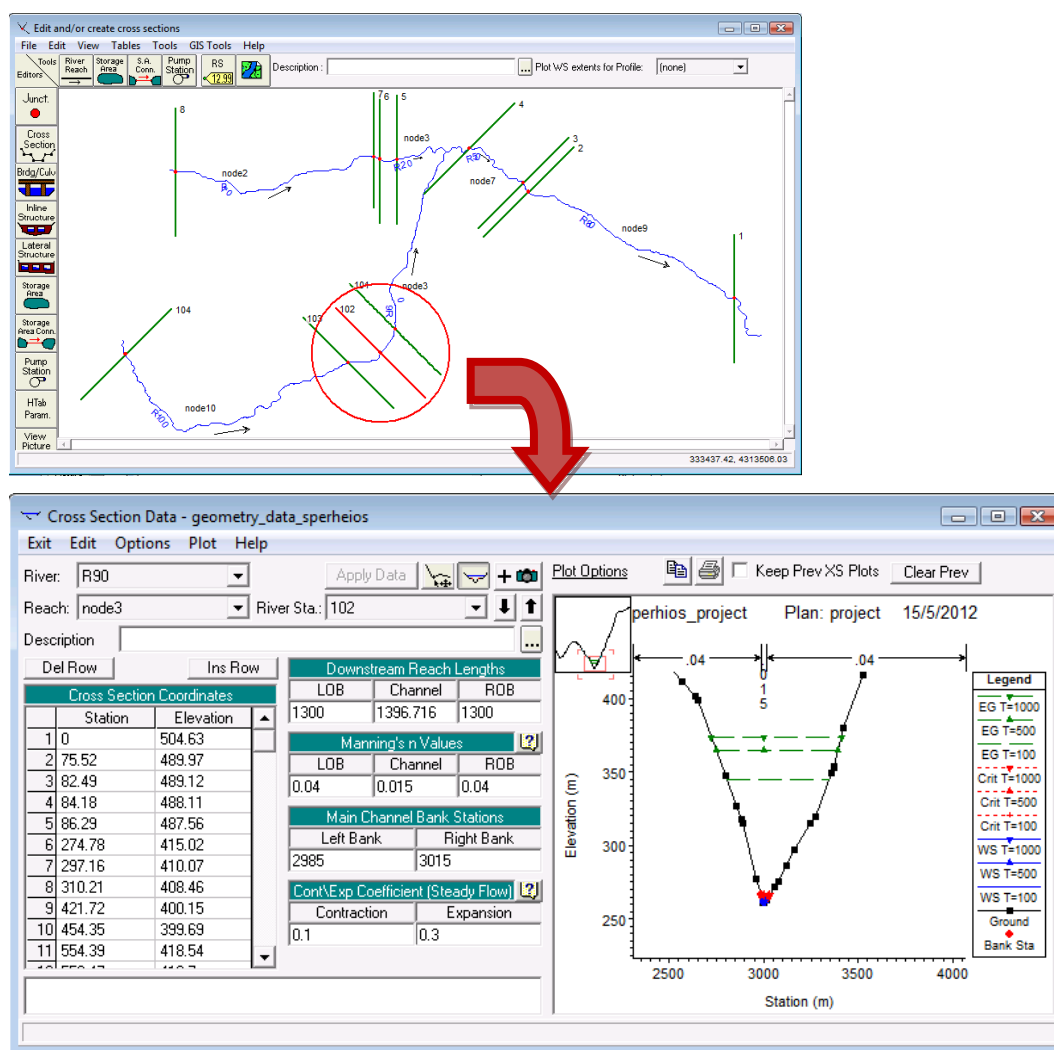
Η υδραυλική προσομοίωση επιτυγχάνεται με την χρήση του προγράμματος HEC-RAS. Το HEC-RAS αποτελεί ένα λογισμικό πακέτο με το οποίο μπορεί να υπολογίσει το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του ποταμού σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής αλλά και τις αποθέσεις φερτών υλικών και τη θερμοκρασία του νερού (Γκιόκας, 2009).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας γίνεται υδραυλική προσομοίωση τμήματος του ποταμού Σπερχειού σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται είναι η εξής:

- Εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων
- Εισαγωγή των υδρολογικών δεδομένων
- Εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών
- Σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών
- Σύνθεση χαρτών κατάκλυσης
- Σύνθεση χαρτών κινδύνου

### 4.3.1 Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων

Τα γεωμετρικά δεδομένα, που προέκυψαν από το HEC-GeoRAS, παρέχουν πληροφορίες για την γεωμετρία των διατομών. Εισάγονται στο παράθυρο του Geometry Data του προγράμματος HEC-RAS, στο οποίο απεικονίζεται ο ποταμός με τα επιλεχθείσες διατομές. Η επισκόπηση και η συμπλήρωση των γεωμετρικών δεδομένων κάθε διατομής γίνεται μέσω της εντολής Cross Section όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Απεικόνιση των γεωμετρικών στοιχείων κάθε διατομής όπως αυτά παρουσιάζονται στο HEC-RAS.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3, τα γεωμετρικά στοιχεία των διατομών που χρησιμοποιούνται για την υδραυλική απεικόνιση είναι τα εξής:

- Το όνομα και το τμήμα του ποταμού στο οποίο ανήκει η διατομή (River / Reach).
- Ο κωδικός της διατομής (River Sta.).
- Τα υψόμετρα σε διάφορα σημεία της διατομής και οι αντίστοιχες αποστάσεις αυτών σε μορφή πίνακα (Cross Section Coordinates).
- Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών κατά μήκος των κύριων διευθύνσεων της ροής σε τρία σημεία, στο αριστερό άκρο, κατά μήκος της μισγάγγειας και στο δεξί άκρο (Downstream Reach Lengths).
- Ο συντελεστής  $n$  του Manning σε τρία τμήματα του ποταμού (Manning's Values).
- Οι αποστάσεις των άκρων της διατομής από τις όχθες του ποταμού αριστερά και δεξιά αντίστοιχα (Main Channel Bank Stations).
- Τιμές για τον υπολογισμό των συντελεστών των τοπικών απωλειών σε συστολή και διαστολή (Cont \ Exp coefficient).
- Απεικόνιση σε σκαρίφημα της διατομής με τετμημένα τις αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών σημείων της διατομής και τεταγμένα τα αντίστοιχα υψόμετρα αυτών.

Κατά την επισκόπηση των στοιχείων των επιλεχθέντων διατομών χρειάστηκαν κάποιες διορθώσεις για την ορθότητα και την καλύτερη παρουσία των δεδομένων. Αρχικά, έγινε μετονομασία του κωδικού κάθε διατομής. Αριθμήθηκαν από το “1” έως το “10” και από το “101” έως “104” από τα κατάντη προς τα ανάντη του ποταμού, όπως ορίζεται από το πρόγραμμα. Η αρίθμηση φαίνεται στη Εικόνα 5.

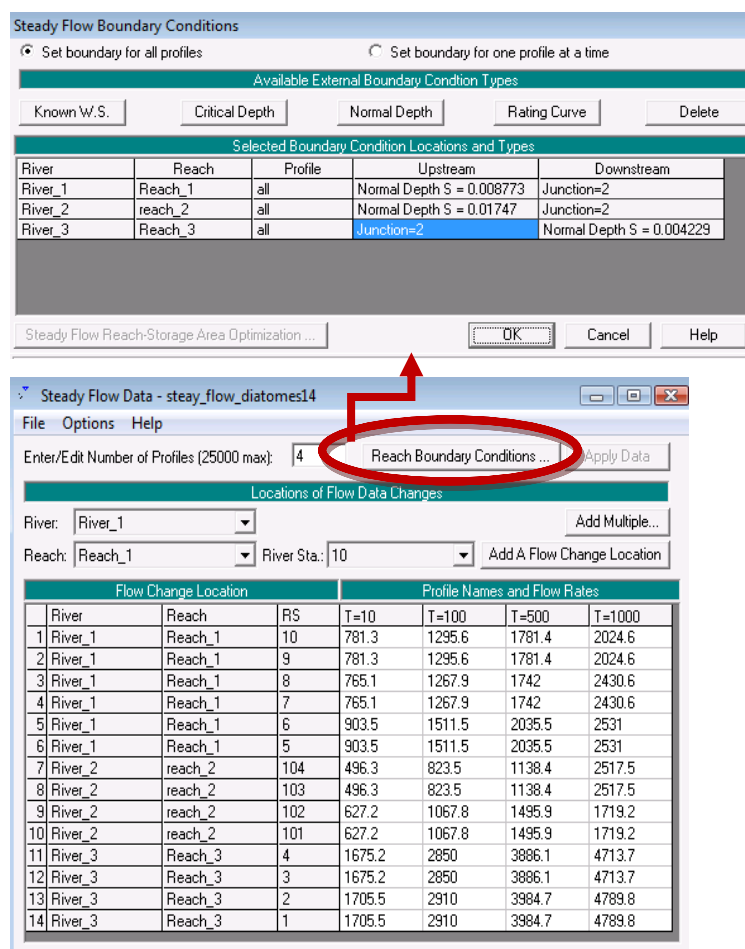
Διορθώθηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών διατομών. Οι διορθώσεις έγιναν βάση μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο ArcMap μέσω του Editor. Ο συντελεστής του Manning υπολογίστηκε κατά τη διαδικασία της προεπεξεργασίας των δεδομένων στο HEC-GeoRAS, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.2.2. Οι υπολογισμένες τιμές εισάγονται στον αντίστοιχο πίνακα.

Τέλος, με την παραδοχή ότι στις διατομές έχουν υπολογιστεί σωστά τα υψόμετρα και το αντίστοιχο TIN από το οποίο προήλθαν δεν περιέχει λάθη, μετακινείται την διατομή, όπου θεωρείται κρίσιμο, ώστε το χαμηλότερο υψομετρικά σημείο να βρίσκεται στο κέντρο της διατομής. Ουσιαστικά, αυτό θα αποτελεί και τον πυθμένα του ποταμού.



### 4.3.2 Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων

Η υδραυλική προσομοίωση γίνεται αρχικά για συνθήκες μόνιμης ροής. Σαν υδρολογικά δεδομένα εισάγονται οι παροχές πλημμυρικής αιχμής, όπως προέκυψαν από την υδρολογική προσομοίωση με τη βοήθεια του προγράμματος HEC-HMS, και οι οριακές συνθήκες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του παραθύρου εισαγωγής των υδρολογικών δεδομένων σε συνθήκες μόνιμης ροής (Steady Flow Data) του HEC-RAS, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Παράθυρα εισαγωγής υδρολογικών δεδομένων του HEC-RAS

Εισάγονται οι πλημμυρικές παροχές για τις τρεις περιόδους επαναφοράς που εξετάστηκαν. Για κάθε τμήμα του ποταμού εισάγονται και οι δύο διατομές με ίδια παροχή αιχμής. Στον τελικό πίνακα των υδρολογικών δεδομένων θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται όλα τα τμήματα του ποταμού και οι αντίστοιχες διατομές τους. Στην συνέχεια, επιλέγονται οι οριακές συνθήκες, οι οποίες οριοθετούν την αρχή για τον υπολογισμό των στοιχείων της εξίσωσης ενέργειας. Οι επιλογές που δίνονται από

τον πρόγραμμα είναι τέσσερις και η επιλογή αυτών εξαρτάται από τα διαθέσιμα στοιχεία της περιοχής. Αρχικά, δίνεται η δυνατότητα της εισαγωγής του πιεζομετρικού φορτίου, αν αυτό είναι γνωστό (Known W.S.). Επίσης, το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίζει το κρίσιμο βάθος και να το θέτει ως οριακή συνθήκη για κάθε προφίλ (Critical Depth). Μια άλλη επιλογή είναι να εισάγεται η κλίση της γραμμής ενέργειας, ώστε να υπολογιστεί το ομοιόμορφο βάθος σε τμήμα του ποταμού και για κάθε μια περίοδο επαναφοράς (Normal Depth). Αν δεν είναι γνωστή η κλίση της γραμμής ενέργειας μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί η κλίση του πυθμένα, αφού στην περίπτωση του ομοιόμορφου βάθους οι κλίσεις αυτές είναι ίσες (Τερζίδης, 1997). Η τελευταία επιλογή που δίνεται από το πρόγραμμα είναι η εισαγωγή ζευγών τιμών στάθμης – παροχής. Με παρεμβολή υπολογίζεται το πιεζομετρικό φορτίο για την αντίστοιχη παροχή (Rating Curve).

Από τα διαθέσιμα στοιχεία που υπήρχαν για το ανάντη τμήμα του Σπερχειού επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του ομοιόμορφου βάθους για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών. Επειδή η κλίση της γραμμής ενέργειας δεν είναι γνωστή χρησιμοποιήθηκε η μέση κλίση του πυθμένα για κάθε τμήμα του υδατορεύματος, όπως αυτή προέκυψε από το ArcMap. Αναλυτικά, οι τιμές της κλίσης του πυθμένα σε κάθε τμήμα φαίνονται στο Σχήμα 4.4.

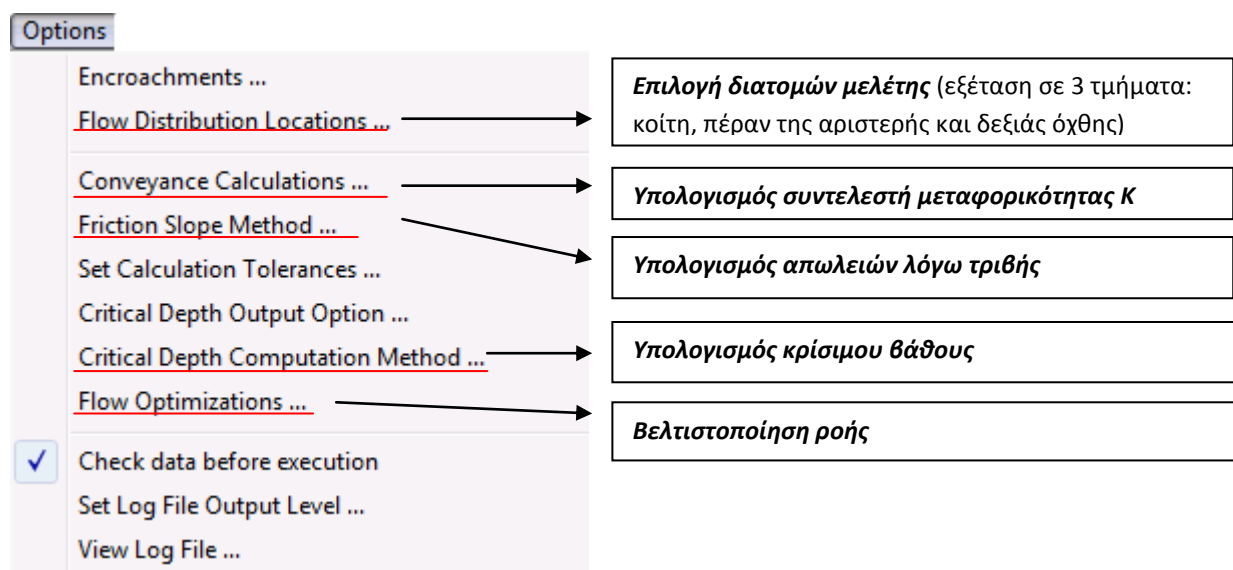
### 4.3.3 Εκτέλεση υδρολογικών υπολογισμών

Η εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών αποτελεί το τελικό βήμα της υδραυλικής προσομοίωσης. Η εκτέλεση αυτών φαίνεται μέσω της εντολής RUN / Steady Flow analysis. Σε αυτό το παράθυρο ζητείται από το χρήστη να καθορίσει τα εξής:

- Όνομα σχεδίου (Plan ID)
- Αρχείο γεωμετρικών δεδομένων (Geometry file)
- Αρχείο υδρολογικών δεδομένων μόνιμης ροής (Steady flow file)
- Είδος ροής. Οι επιλογές που δίνονται στον χρήστη είναι να ορίσει την ροή ως υποκρίσιμη (Subcritical), υπερκρίσιμη (Supercritical) ή μικτή (Mixed). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μικτή ροή.



Ωστόσο για ακριβέστερα αποτελέσματα απαιτείται ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου. Έτσι, αναπαρίστανται καλύτερα και οι συνθήκες μόνιμης ροής. Οι παράμετροι αυτοί φαίνονται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Παράμετροι της υδραυλικής προσομοίωσης στο HEC-RAS.

### ➤ Παράμετροι επίλυσης της εξίσωσης ενέργειας

Σε συνθήκες μόνιμης ροής υπολογίζεται το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας του νερού με τη επίλυση της εξίσωσης ενέργειας σε μονοδιάστατη ανάλυση. Η επίλυση γίνεται από διατομή σε διατομή διαδοχικά με επαναληπτικό αλγόριθμο, με στόχο την σύγκλιση των δύο υπολογισμένων πιεζομετρικών βαθών για την ίδια διατομή (Γκικόκας, 2009).

Η ολική ενέργεια ή το ολικό φορτίο, ως προς ένα επίπεδο αναφοράς, από την εξίσωση (Τερζίδης, 1997):

$$H = z + E = z + y + \frac{aV^2}{2g} \quad (4.1)$$

Η εξίσωση ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών είναι:

$$z_1 + y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} + \Delta H \quad (4.2)$$

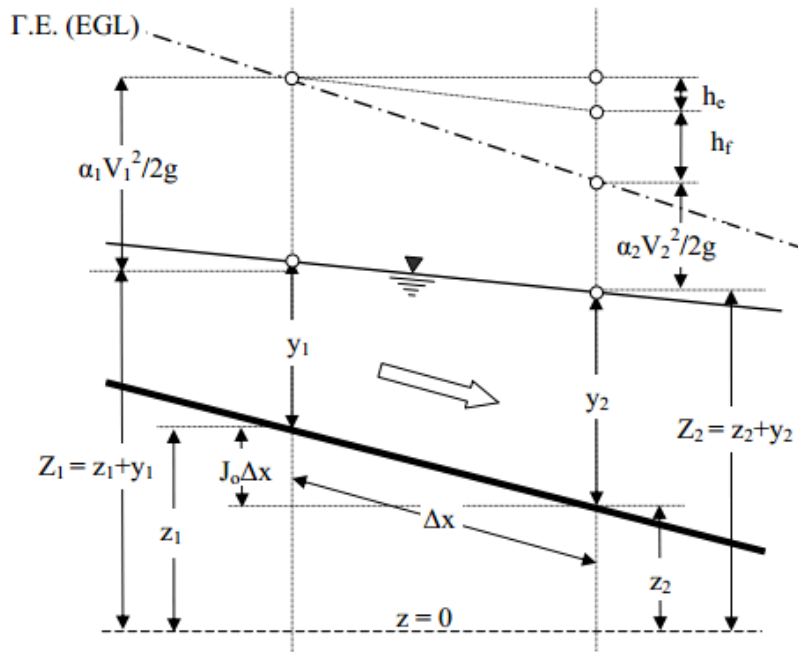
όπου,

$z_1, z_2$  : υψόμετρα πυθμένα υδατορεύματος από επίπεδο αναφοράς

$y_1, y_2$  : βάθη νερού

- $V_1, V_2$  : μέσες ταχύτητες ροής στις διατομές
- $g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας
- $\Delta H$  : ολικές απώλειες ενέργειας (τοπικές και γραμμικές)
- $\alpha_1, \alpha_2$  : συντελεστές διόρθωσης της κινητικής ενέργειας

Τα παραπάνω μεγέθη φαίνονται αντίστοιχα και στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Απεικόνιση μεγεθών της εξίσωσης ενέργειας. (ΠΗΓΗ: Παπανικολάου, 2007)

Οι ολικές απώλειες ενέργειας περιλαμβάνουν τις τοπικές και τις γραμμικές απώλειες και δίνονται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\Delta H = L * \overline{S_f} + C * \left| \frac{\alpha_1 * V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 * V_2^2}{2g} \right| \quad (4.3)$$

όπου,

- $L$  : μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών
- $\overline{S_f}$  : απώλειες λόγω τριβής
- $C$  : συντελεστής συστολής / διαστολής για τις τοπικές απώλειες ενέργειας. Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής είναι 0.3 για διαστολή και 0.1 για συστολή.

$$\left| \frac{a_1 * V_1^2}{2g} - \frac{a_2 * V_2^2}{2g} \right| : \text{διαφορά κινητικής ενέργειας μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών}$$

### Υπολογισμός γραμμικών απωλειών

Η μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών και δίνεται από τον τύπο:

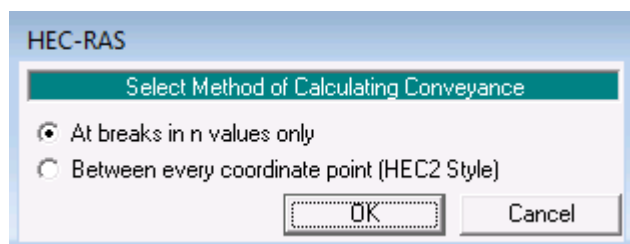
$$L = \frac{L_{lob} * \overline{Q}_{lob} + L_{ch} * \overline{Q}_{ch} + L_{rob} * \overline{Q}_{rob}}{\overline{Q}_{lob} + \overline{Q}_{ch} + \overline{Q}_{rob}} \quad (4.4)$$

όπου

$L_{lob}$  ,  $L_{ch}$  ,  $L_{rob}$  : αποστάσεις μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών κατά την διεύθυνση της ροής για το αριστερό τμήμα, την κοίτη και το δεξί τμήμα αντίστοιχα.

$\overline{Q}_{lob}$  ,  $\overline{Q}_{ch}$  ,  $\overline{Q}_{rob}$  : μέσες παροχές μεταξύ των διατομών στο αριστερό τμήμα, στην κοίτη και το δεξί τμήμα αντίστοιχα.

Επίσης, υπολογίζεται ο συντελεστής μεταφορικότητας K. δίνεται η επιλογή μεταξύ δύο μεθόδων για τον υπολογισμό αυτού, οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.7.



**Σχήμα 4.7:** Μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή μεταφορικότητας στο HEC-RAS.

Η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι η «At breaks in n values only» όπου τα τμήματα αριστερά και δεξιά των οχθών μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους τμήματα αν αλλάζει ο συντελεστής του Manning σε αυτά. Το τμήμα της κοίτης εξετάζεται σαν ενιαίο τμήμα. Εν συνεχεία, δίνεται η τιμή  $K_i$  για κάθε τμήμα που έχει ενιαίο συντελεστή  $n$  και τέλος αθροίζονται όλες οι τιμές για το δεξί τμήμα πέραν της όχθης

και το αριστερό αντίστοιχα. Ο συντελεστής μεταφορικότητας K υπολογίζεται από την σχέση:

$$K = \frac{1.486}{n} * A * R^{2/3} \quad (4.5)$$

όπου,

n : συντελεστής του Manning

A : εμβαδό διατομής

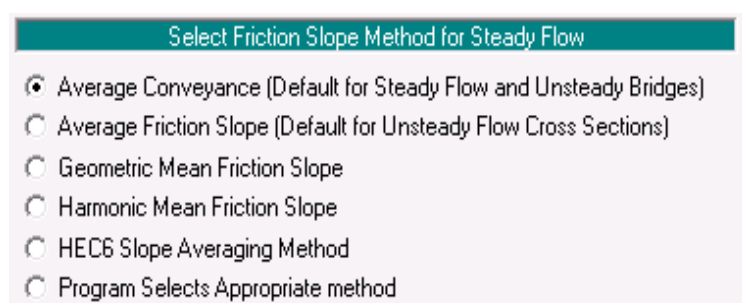
R : υδραυλική ακτίνα

Η τελική τιμή του συντελεστή K για όλη της διατομή δίνεται από τον τύπο

$$K = K_{lob} + K_{ch} + K_{rob}$$

(4.6)

Για τον υπολογισμό απωλειών λόγω τριβής δίνονται έξι επιλογές μεθόδου, όπως φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Επιλογές μεθόδου για τον υπολογισμό απωλειών λόγω τριβής στο HEC-RAS.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η μέθοδος «Average Conveyance» σύμφωνα με την οποία η μέση κλίση της γραμμής ενέργειας δίνεται από την σχέση:

$$S_f = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad (4.7)$$

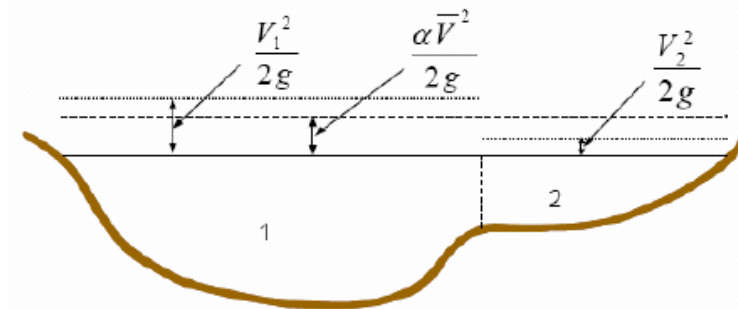
,όπου

Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> : μέσες παροχές σε δύο διατομές

K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> : συντελεστής μεταφορικότητας K για κάθε διατομή

### Υπολογισμός τοπικών απωλειών

Για τον υπολογισμό των τοπικών απωλειών απαιτείται η εκτίμηση του συντελεστή συστολής / διαστολής και ο υπολογισμός της μέσης κινητικής ενέργειας κάθε διατομής, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9: Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας διατομής . (ΠΗΓΗ Γκιόκας, 2009)

Η μέση κινητική ενέργεια δίνεται από την σχέση:

$$\alpha \frac{V^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2} \quad (4.8)$$

όπου

$V_1, V_2$  : ταχύτητα στο αριστερό και το δεξί πλευρικό τμήμα της διατομής αντίστοιχα

$Q_1, Q_2$  : παροχή στο αριστερό και δεξί πλευρικό τμήμα της διατομής αντίστοιχα

$V$  : μέση ταχύτητα όλης της διατομής

$\alpha$  : συντελεστής διόρθωσης της κινητικής ενέργειας

Αφού υπολογιστεί ο συντελεστής κινητικής ενέργειας και οι μέσες ταχύτητες για κάθε διατομή υπολογίζονται οι τοπικές απώλειες ενέργειας μέσω της σχέσης:

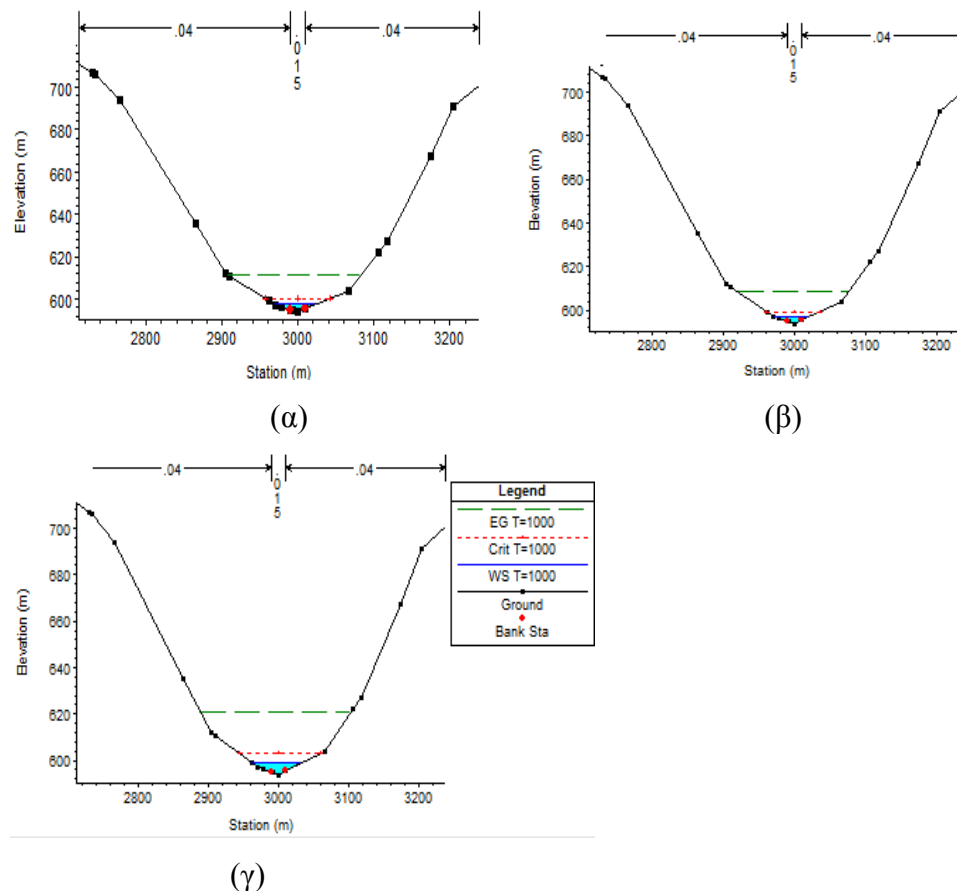
$$h_e = C * \left| \frac{a_1 * V_1^2}{2g} - \frac{a_2 * V_2^2}{2g} \right| \quad (4.9)$$

Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών υπολογίζεται το κρίσιμο βάθος ροής και συγκρίνεται με το πιεζομετρικό βάθος στην κάθε διατομή για την επαλήθευση των εισερχόμενων δεδομένων. Η μέθοδος που επιλέγεται στην παρούσα εργασία για τον

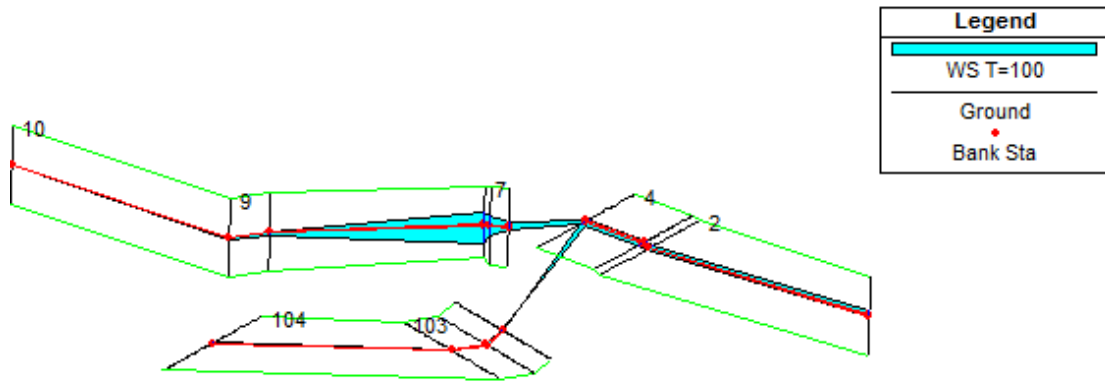
υπολογισμό του κρίσιμου βάθους είναι η παραβολική γιατί αποτελεί την ταχύτερη μέθοδο και προτείνεται από τους σχεδιαστές του HEC-RAS (Brunel, 2008b).

#### 4.3.4 Επισκόπηση αποτελεσμάτων

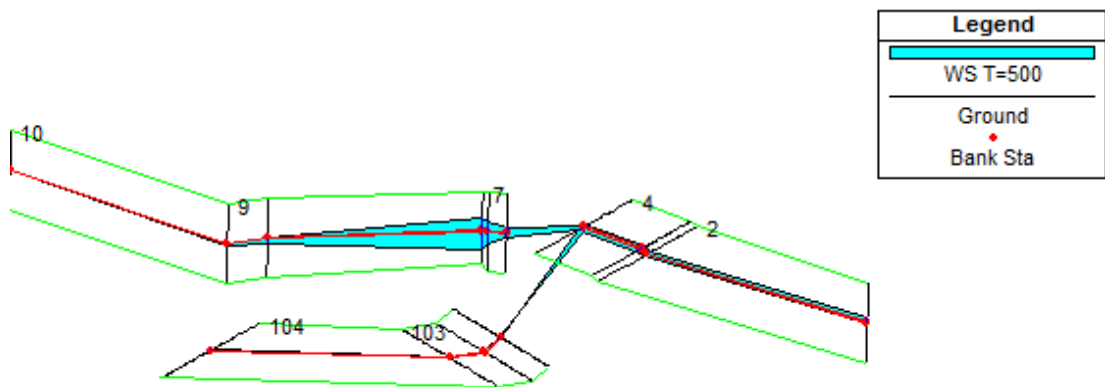
Το HEC-RAS δίνει τη δυνατότητα επισκόπησης των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων και πινάκων για όλες τις διατομές και την μηκοτομή του ποταμού. Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω στο σχήμα 4.10 τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης του ποταμού Σπερχειού στη διατομή 104 του ποταμού 2 για περίοδο επαναφοράς  $T=100$ ,  $T=500$  και  $T=1000$  έτη καθώς και μια διδιάστατη απεικόνιση της πλημμυρικής κατάκλισης σε όλο το τμήμα μελέτης για τις παραπάνω περιόδους επαναφοράς στο Σχήμα 4.11, 4.12 και 4.13 αντίστοιχα. Τέλος, στο Σχήμα 4.14 φαίνονται (α) η μεταβολή στάθμης στη διατομή 10 του ποταμού 1, (β) η μεταβολή στάθμης στη διατομή 104 του ποταμού 2 και (γ) η μεταβολή στάθμης στη διατομή 4 του ποταμού .



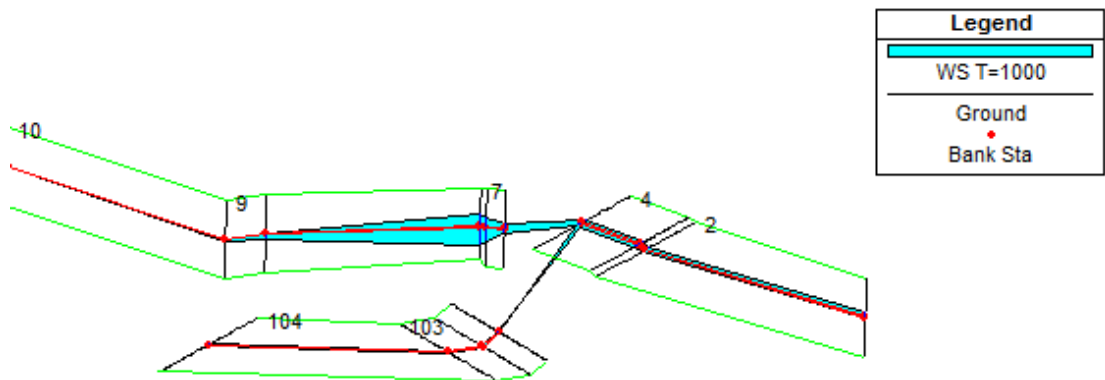
**Σχήμα 4.10:** (α) Διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 100 ετών (β) διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 500 ετών και (γ) διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 1000 ετών



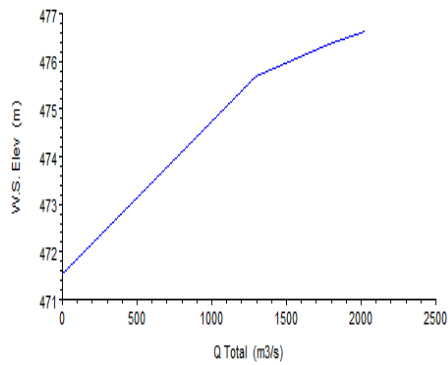
*Σχήμα 4.11: Δισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς  $T=100$  έτη.*



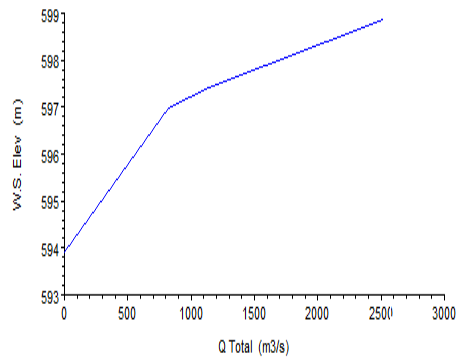
*Σχήμα 4.12: Δισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς  $T=500$  έτη.*



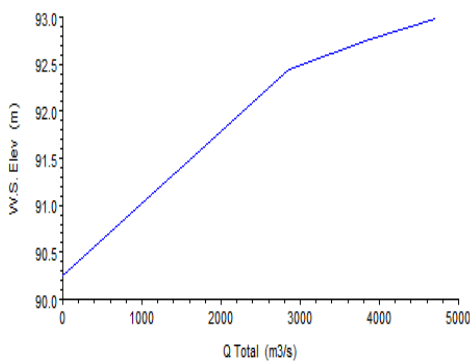
*Σχήμα 4.13: Δισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς  $T=1000$  έτη.*



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 4.14:** Μεταβολή στάθμης στη διατομή 10 του ποταμού 1, (β) Μεταβολή στάθμης στη διατομή 104 του ποταμού 2 και (γ) Μεταβολή στάθμης στη διατομή 4 του ποταμού .

Στον παρακάτω Πίνακα 4.2 φαίνεται η έκταση της πλημμυρικής κατάκλυσης συνολικά και πέραν των οχθών. Ουσιαστικά ενδιαφέρων παρουσιάζει η έκταση της πλημμύρας εκτός των οχθών, αφού ουσιαστικά έτσι ορίζεται και η πλημμύρα.

Πίνακας 4.2: Έκταση πλημμυρικής κατάκλυσης από πλημμύρες με περίοδο επαναφοράς 10, 100, 500 και 1000 έτη.

ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ	ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΗ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗ	
	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΚΤΑΣΗ	ΕΚΤΟΣ ΤΩΝ ΟΧΘΩΝ
T=10	12934900	3547734.576
T=100	15116100	4659290.564
T=500	16797500	5668859.652
T=1000	18574600	6576581.984



Η υδραυλική προσομοίωση του τμήματος του ποταμού Σπερχειού για συνθήκες μη μόνιμης ροής δεν κατέστη δυνατή μέσω του προγράμματος του HEC-RAS. Η έντονη μορφολογία του εδάφους, με τις έντονες κλίσεις στα δυτικά της λεκάνης και τις επίπεδες επιφάνειες στα νοτιοανατολικά αυτής σε συνδυασμό με την γεωμετρία του ποταμού αποτέλεσαν τις αιτίες που δεν ολοκληρώθηκε επιτυχώς η διαδικασία της επίλυσης της μη μόνιμης ροής.

Κάνοντας μια πολύ συντηρητική προσέγγιση, ότι η σχέση που συνδέει την παροχή με τον χρόνο είναι γραμμική, μπορεί να εκτιμηθεί ένας μέσος όρος του χρόνου παραμονής της πλημμύρας. Εκτιμάται, λοιπόν, ότι η παροχή αιχμής της πλημμύρας εμφανίζεται περίπου στη μιάμιση μέρα.

## 5 ΣΥΝΘΕΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

### 5.1 Εισαγωγή


Τελικό προϊόν της υδραυλικής προσομοίωσης του ποταμού Σπερχειού αποτελεί η σύνθεση χαρτών πλημμύρας. Αυτοί αποτελούν μια γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του πλημμυρικού γεγονότος για την περιοχή μελέτης, όπου δίνουν πληροφορίες για τη πιεζομετρική επιφάνεια του ποταμού, τα όρια της κατάκλυσης και τα βάθη του νερού σε αυτή.

Για την παραγωγή χαρτών πλημμύρας χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά προγράμματα HEC-RAS και HEC-GeoRAS. Η διαδικασία που ακολουθείται για την εξαγωγή των χαρτών, μέσω των προγραμμάτων, είναι η εξής:

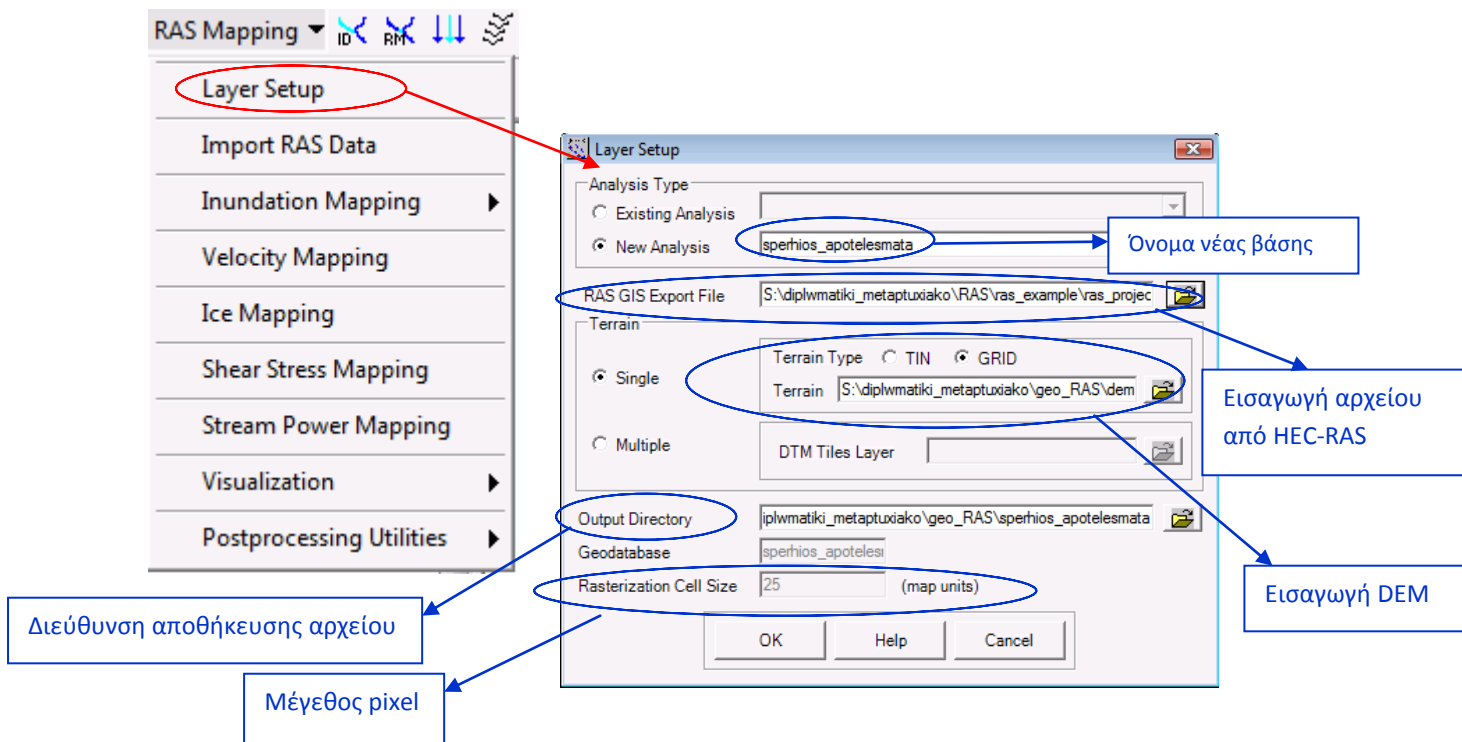
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο HEC-RAS
- Σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών
- Σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης

### 5.2 Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο HEC-GeoRAS

Τα δεδομένα της υδραυλικής προσομοίωσης εισάγονται στο περιβάλλον του HEC-GeoRAS με σκοπό την δημιουργία χαρτών με τα πιεζομετρικά βάθη και τις πλημμυρικές κατακλύσεις. Η εξαγωγή των δεδομένων από το HEC-RAS γίνεται μέσω της εντολής File / Export GIS data.

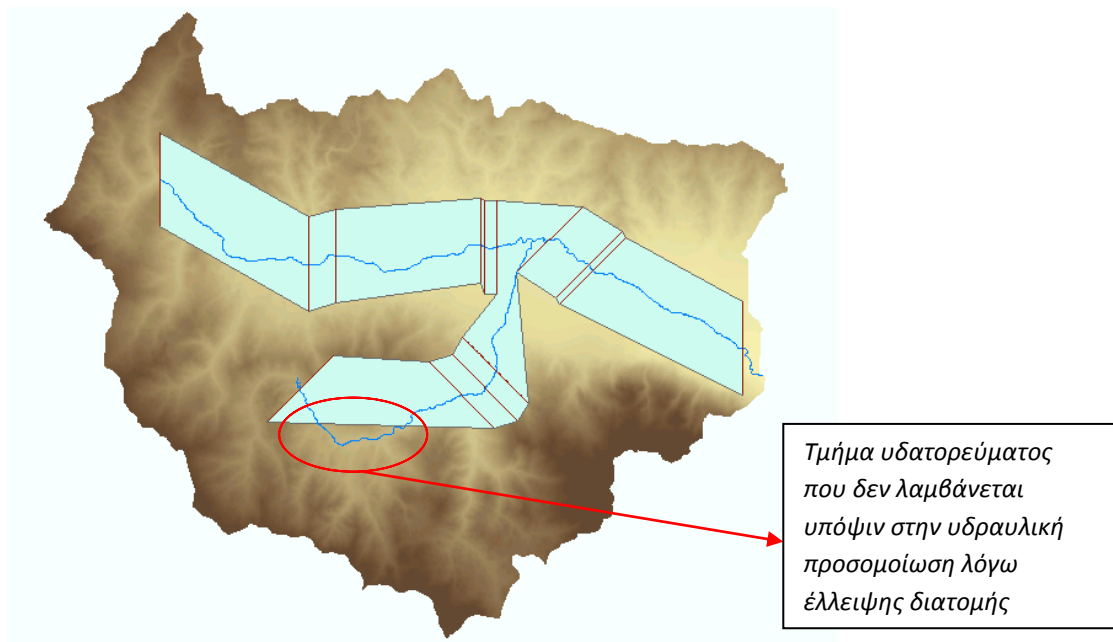
Εισάγεται το αρχείο των υδραυλικών δεδομένων στο HEC-GeoRAS και μετατρέπεται από αρχείο sdf σε αρχείο XML με τη χρήση του εργαλείου .

Τα υδραυλικά δεδομένα συνδυάζονται στο HEC-GeoRAS με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της λεκάνης του Σπερχειού μέσω της εντολής RAS Mapping / Layer Setup. Ζητείται να καθοριστεί και το μέγεθος του φατνίου στο κάρναβο με τα βάθη νερού το οποίο ορίζεται ίσο με το μέγεθος του φατνίου του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, που στην παρούσα εργασία είναι 25 x 25 m. Έτσι, δημιουργείται μια νέα βάση στο ArcMap που εισάγεται αρχικά το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, και θα αποτελέσει αρχείο αποθήκευσης των χαρτών πιεζομετρικών βαθών και κατάκλισης. Η διαδικασία αυτή φαίνεται αναλυτικά και στο παρακάτω Σχήμα 5.1.



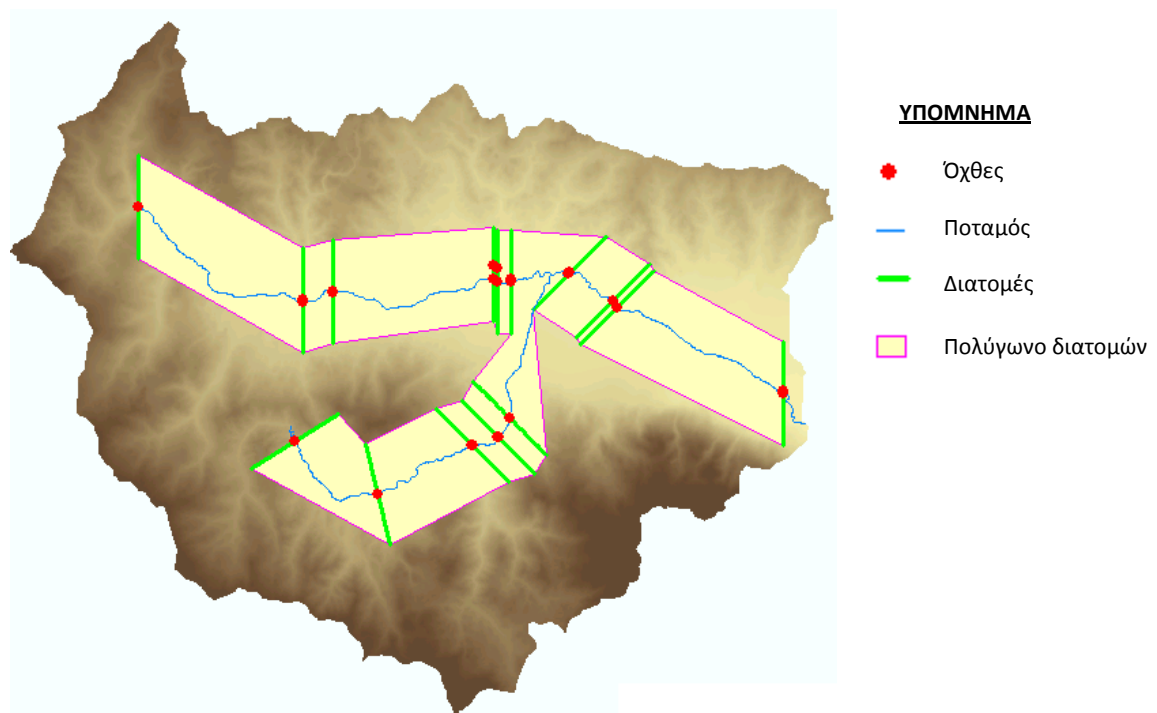
*Σχήμα 5.7: Διαδικασία εισαγωγής δεδομένων της υδραυλικής προσομοίωσης στο HEC-GeoRAS για την δημιουργία χαρτών πλημμύρας.*

Με την εντολή RAS Mapping / Import Ras Data δημιουργούνται δύο νέα θεματικά επίπεδα, όπου στο ένα περιέχονται οι διατομές και στο άλλο τα όρια κατάκλυσης. Επίσης, δημιουργείται ένα αρχείο που περιέχει το πολύγωνο που σχηματίζεται από τις διατομές. Οι πλευρές του πολυγώνου προκύπτουν από γραμμική παρεμβολή μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών. Για τον λόγο αυτό, χρειάστηκε να εισαχθεί άλλη μια διατομή μεταξύ των διατομών 103 και 104, γιατί λόγω της γραμμικής παρεμβολής δεν συμπεριλαμβανόταν ένα τμήμα του ποταμού στην προσομοίωση, όπως φαίνεται και στο Χάρτη 5.1.



*Χάρτης 5.1: Απεικόνιση του πολυγώνου που σχηματίζεται από τις διατομές του ποταμού και επισήμανση του τμήματος που δεν λαμβάνεται υπόψιν κατά την υδραυλική προσομοίωση.*

Η διατομή εισάγεται στο HEC-RAS μέσω της εντολής Tools / XS Interpolation / Between 2 XS's, όπου ζητείται να προσδιοριστεί το τμήμα του ποταμού που θα δημιουργηθεί η νέα διατομή, οι δύο διατομές ανάμεσα στις οποίες θα δημιουργηθεί και, τέλος, η απόσταση αυτής από την ανάντη διατομή, η οποία ορίστηκε ίση με 1600 m. Αφού δημιουργήθηκε η νέα διατομή εκτελέστηκαν οι υπολογισμοί της υδραυλικής προσομοίωσης όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 3 και εξήχθησαν τα αποτελέσματα αυτής, σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία. Έτσι το πολύγωνο που σχηματίζεται με την εισαγωγή της νέας διατομής εμφανίζεται στο Χάρτη 5.2.

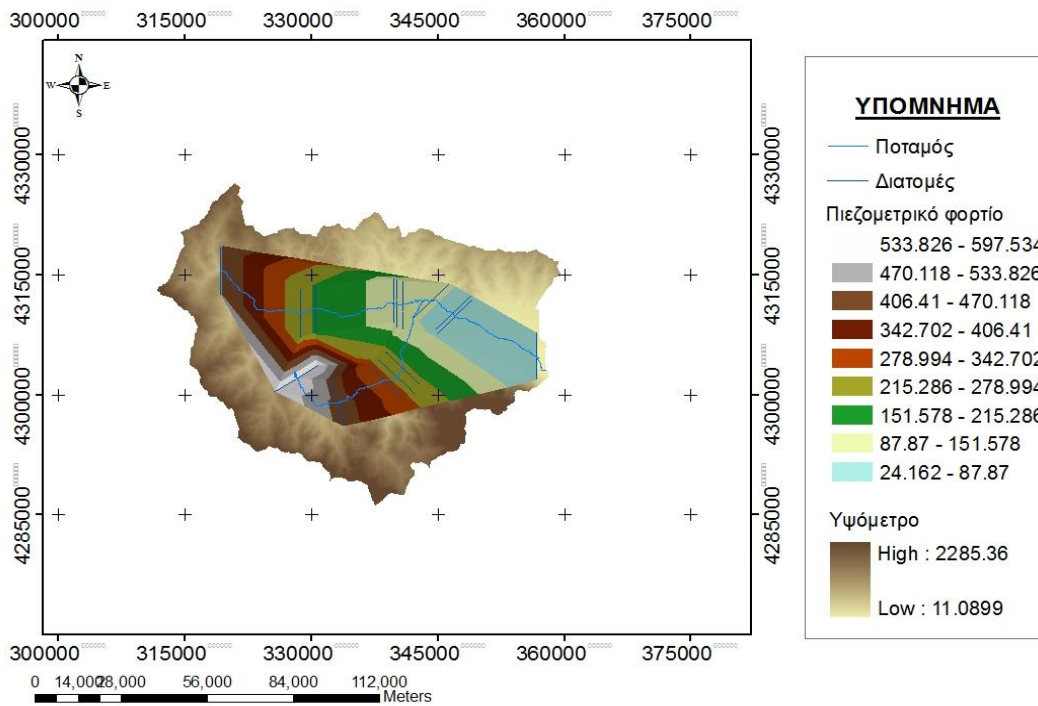


*Χάρτη 5.2: Απεικόνιση του πολυγώνου που σχηματίζεται από τις διατομές του ποταμού στο HEC-GeoRAS.*

### 5.3 Σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών

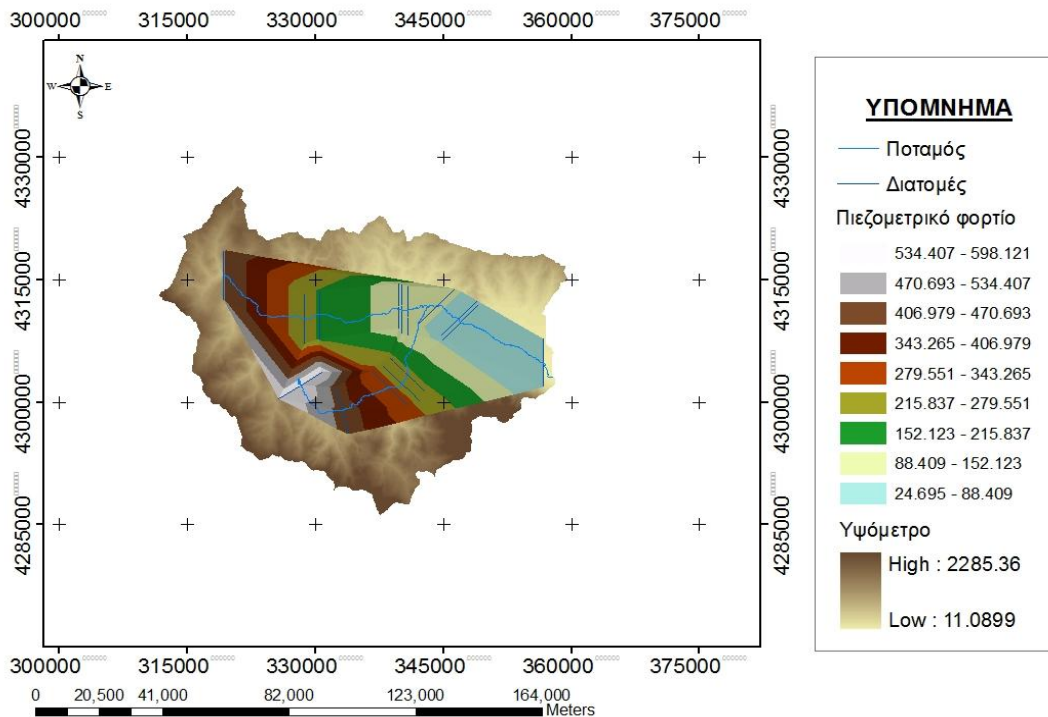
Αρχικά, κατασκευάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο της υδάτινης επιφάνειας από τις διατομές και το πιεζομετρικό φορτίο ε κάθε διατομή. Εν συνεχεία, δημιουργούνται οι πιεζομετρικές επιφάνειες για τα πλημμυρικά επεισόδια της προσομοίωσης. η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται μέσω της εντολής RAS Mapping / Inundation Mapping / Water Surface Generation, όπου ζητείται να προσδιοριστεί κάθε φορά το πλημμυρικό επεισόδιο που την απεικονίσει. Δημιουργούνται οι πιεζομετρικοί χάρτες και για τις τέσσερις περιόδους επαναφοράς για τις οποίες εκτελέστηκε η υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση. Στους Χάρτες 5.3, 5.4, 5.5 και 5.6 απεικονίζονται τα πιεζομετρικά βάθη για πλημμύρες με περίοδο επαναφοράς 10, 100, 500 και 1000 έτη.

### Πιεζομετρικός Χάρτης για περίοδο επαναφοράς T=10 έτη

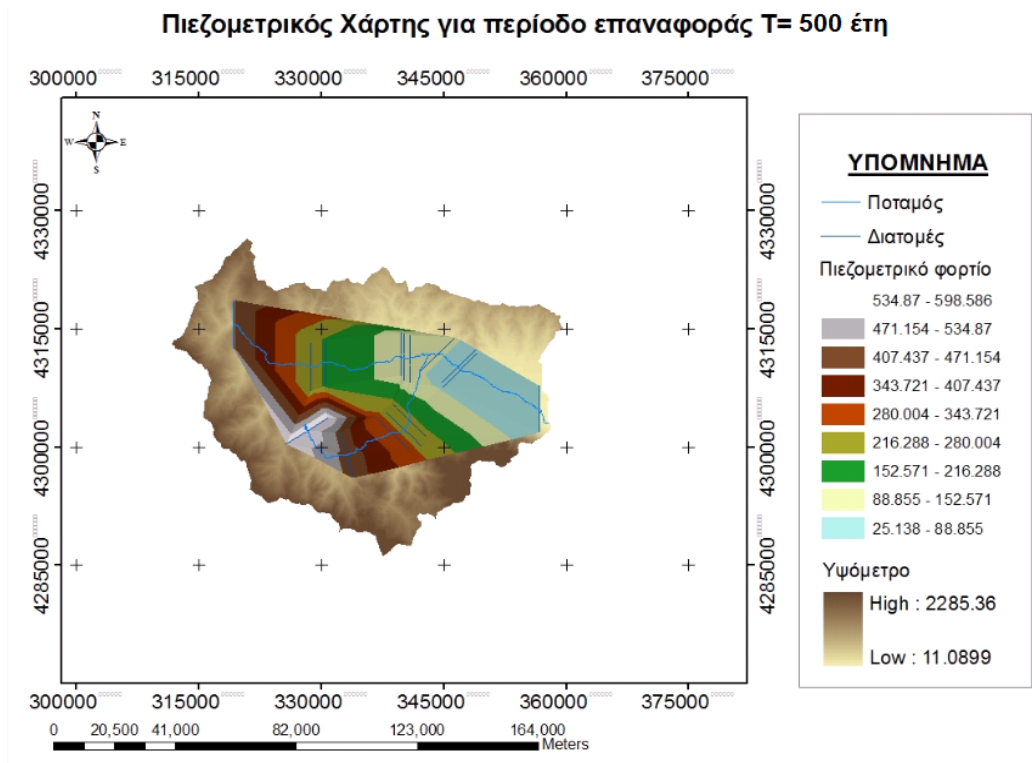


Χάρτης 5.3: Πιεζομετρικός χάρτης για την ανάντη λεκάνη του ποταμού Σπερχειού και για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς T=10 έτη.

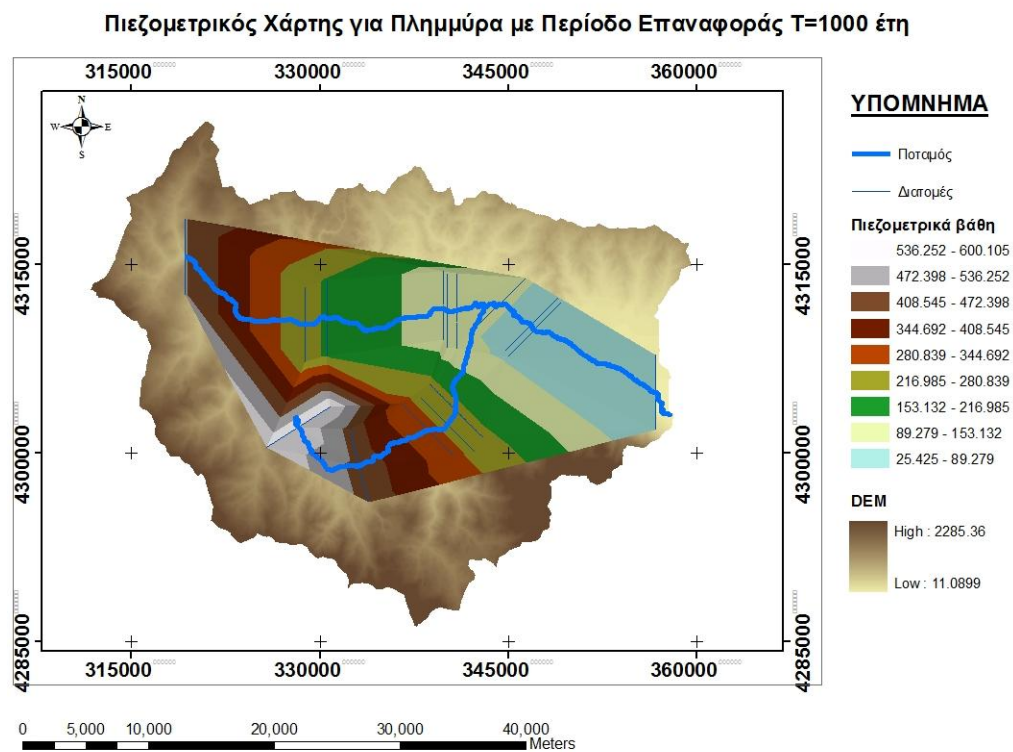
### Πιεζομετρικός Χάρτης για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη



Χάρτης 5.4: Πιεζομετρικός χάρτης για την ανάντη λεκάνη του ποταμού Σπερχειού και για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς T=100 έτη.



*Χάρτης 5.5: Πιεζομετρικός χάρτης για την ανάντη λεκάνη του ποταμού Σπερχειού και για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς T=500 έτη.*



**Χάρτης**

*5.6: Πιεζομετρικός χάρτης για την ανάν λεκάνη του ποταμού Σπερχειού και για πλημμύρα περιόδου επαναφοράς T=1000 έτη.*

## 5.4 Σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης

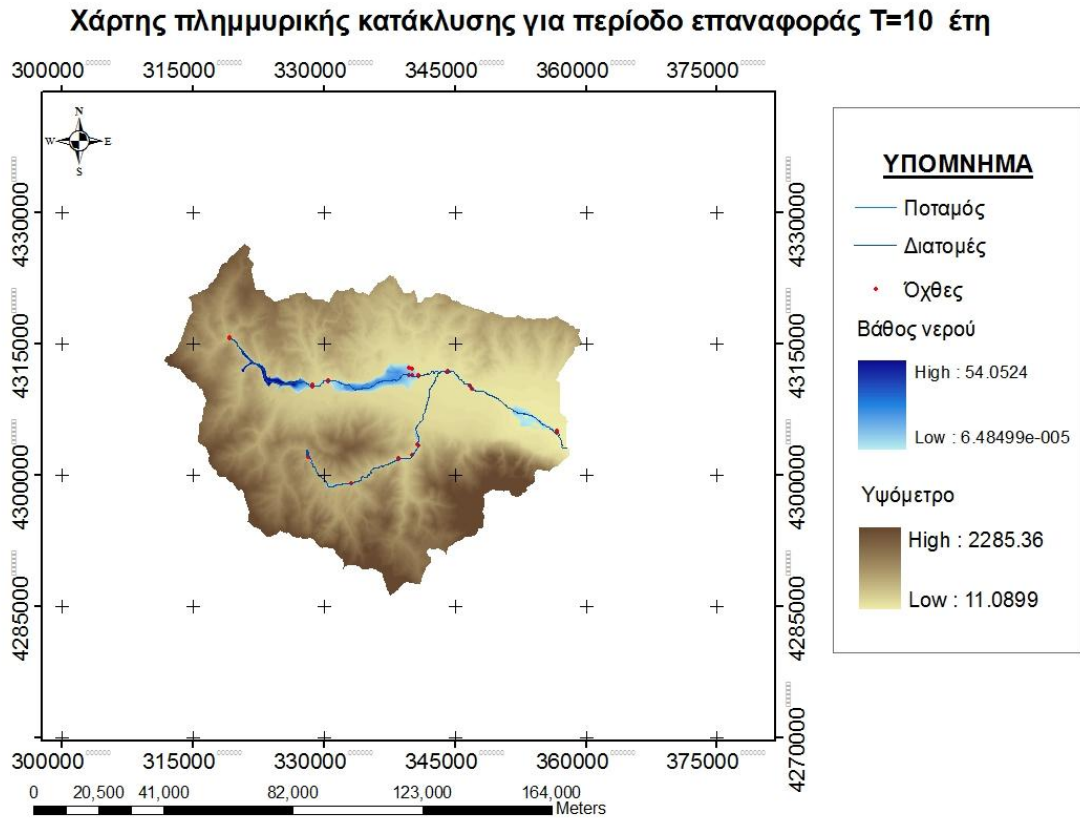
Οι χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης απεικονίζουν το πλημμυρικό πεδίο, για μια συγκεκριμένη πλημμύρα σχεδιασμού, με ακριβή όρια. Επίσης, δίνουν πληροφορίες για το βάθος του νερού σε όλο το πλημμυρικό πεδίο.

Η σύνθεση των χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης υλοποιείται με τον συνδυασμό της πιεζομετρικής επιφάνειας, όπως αυτή προέκυψε παραπάνω, με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζονται τα ακριβή όρια της κατάκλυσης και τα βάθη του νερού στο πλημμυρικό πεδίο, υπολογίζοντας τη διαφορά των υψομέτρων μεταξύ του πιεζομετρικού χάρτη και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας γίνεται μέσω της εντολής RAS Mapping / Inundation Mapping / Floodplain delineation για κάθε πλημμυρικό επεισόδιο που προέκυψε από την υδραυλική προσομοίωση.

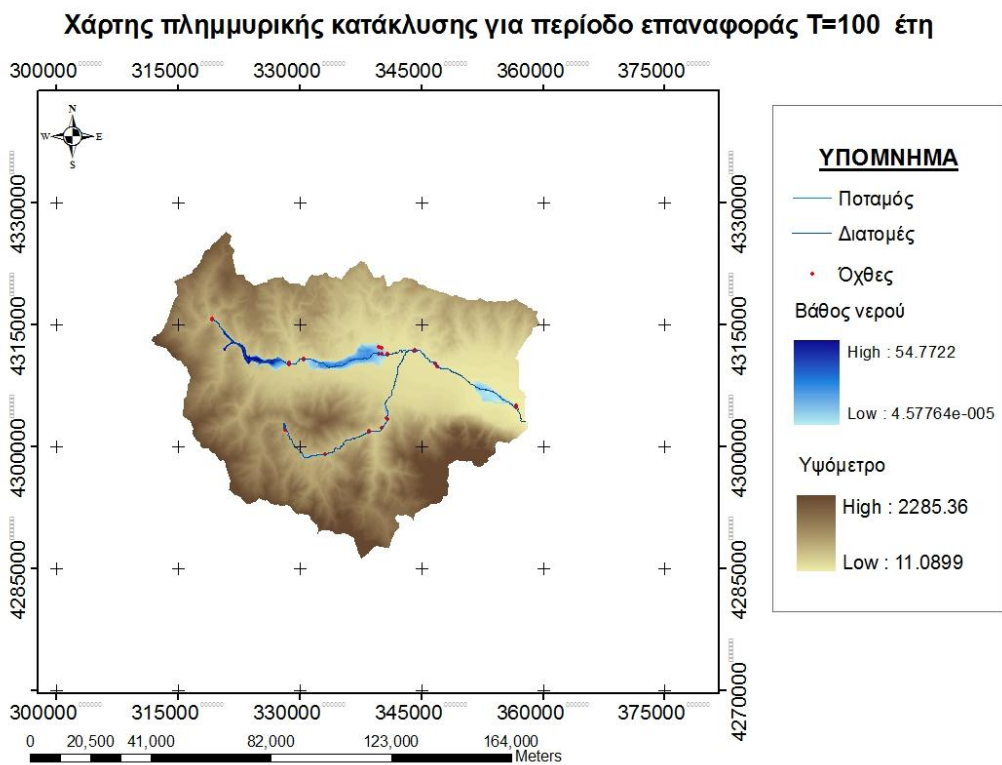
Έτσι, δημιουργούνται δύο αρχεία. Το ένα περιέχει τα όρια της πλημμυρικής κατάκλυσης σε μορφή πολυγώνου και έχει το πρόθεμα «b». Το άλλο περιέχει, επίσης, τα βάθη του νερού και συμβολίζεται με το πρόθεμα «d».

Στους Χάρτες 5.7, 5.8, 5.9 και 5.10 απεικονίζονται τα πλημμυρικά πεδία και τα αντίστοιχα βάθη νερού για πλημμύρες που προέρχονται από περιόδους επαναφοράς  $T=10$ ,  $T=100$ ,  $T= 500$  και  $T=1000$  έτη, αντίστοιχα.



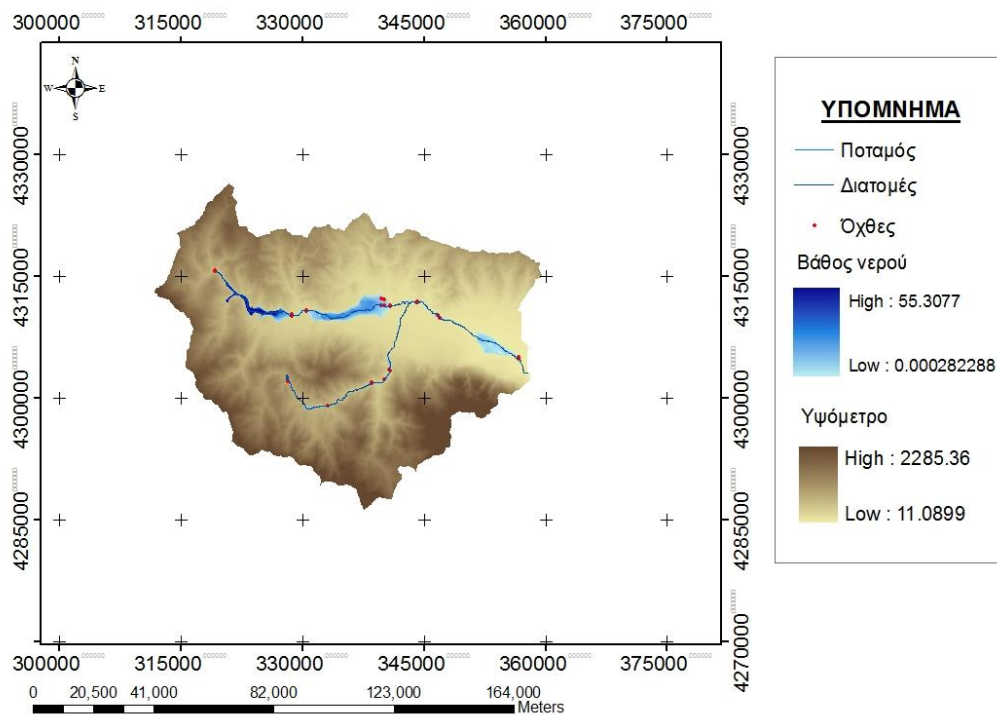


Χάρτης 5.7: Χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς  $T=10$  έτη.



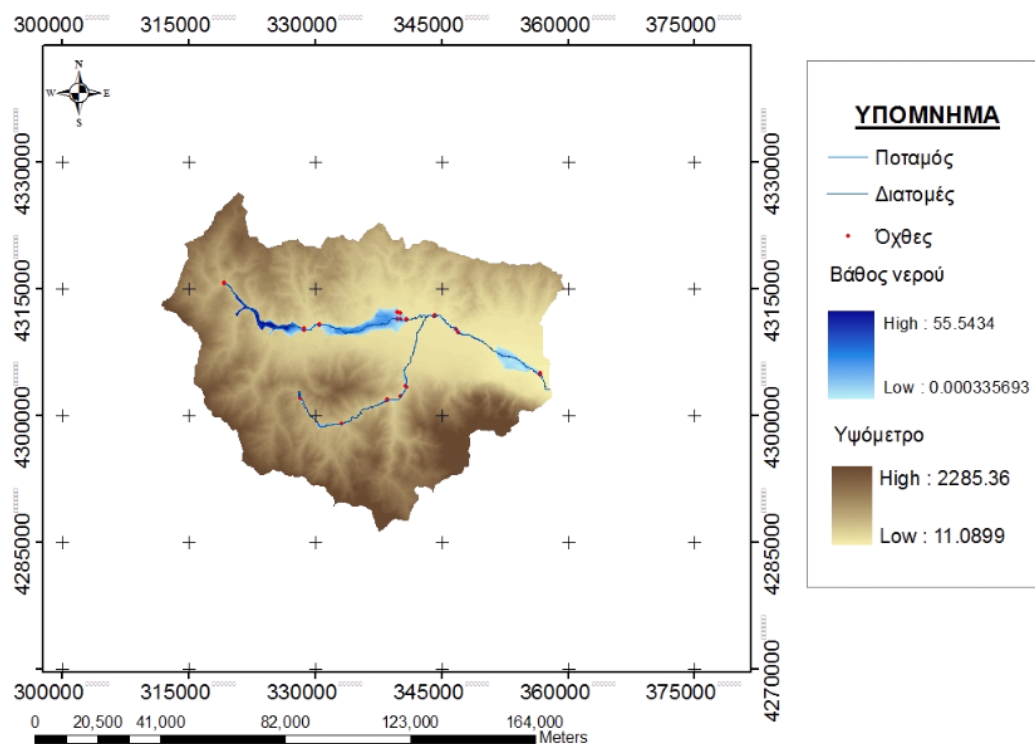
Χάρτης 5.8: Χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς  $T=100$  έτη.

### Χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης για περίοδο επαναφοράς $T=500$ έτη



Χάρτης 5.9: Χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς  $T=100$  έτη.

### Χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης για περίοδο επαναφοράς $T=1000$ έτη



Χάρτης 5.10: Χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς  $T=100$  έτη.

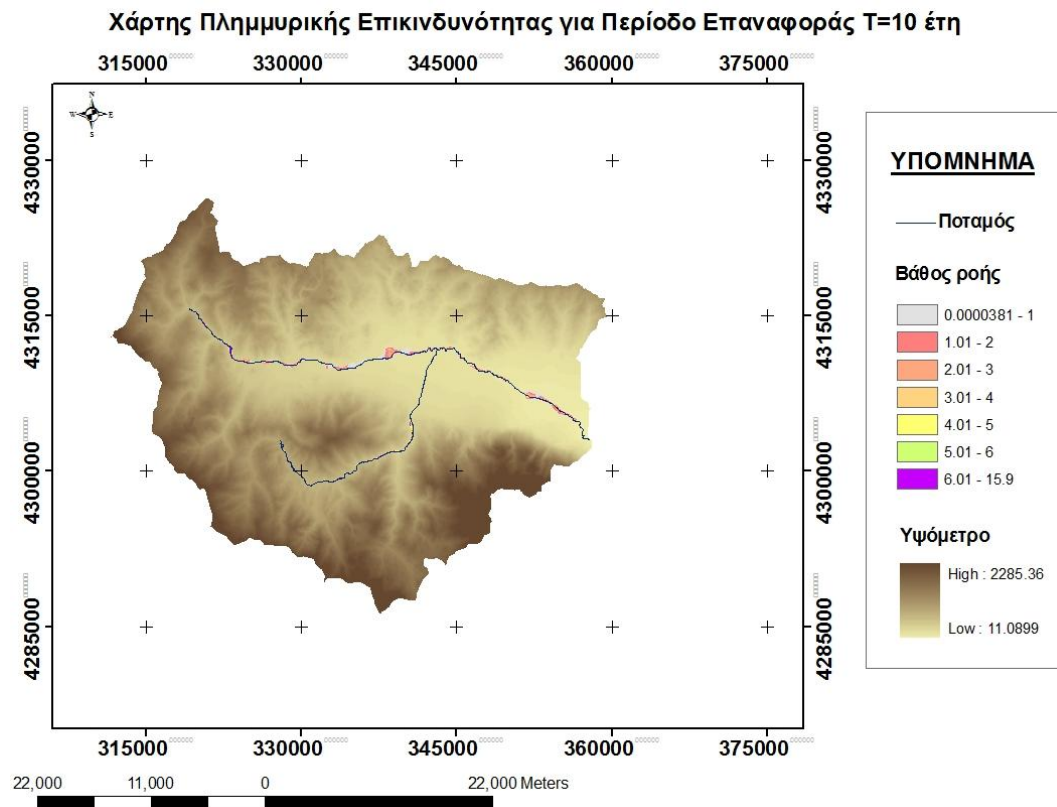
Στους παραπάνω χάρτες παρατηρείται ότι τα βάθη ροής σε ορισμένα σημεία του ποταμού είναι αρκετά υπερεκτιμημένα. Αυτό οφείλεται στη διαδικασία υπολογισμού των πιεζομετρικών υψών που κάνει το HEC-RAS, όπου κάνει γραμμική παρεμβολή μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών για να υπολογίσει τα πιεζομετρικά βάθη στο τμήμα μεταξύ αυτών. Για την διόρθωση αυτών των βαθών θεωρήθηκε σκόπιμο να προστεθούν και άλλες διατομές στο τμήμα του ποταμού που εξετάζεται. Αυτό κατέστη εφικτό με την εντολή Interpolation του προγράμματος HEC-RAS, όπου ορίζεται το τμήμα του ποταμού που θα προστεθούν οι διατομές και η μεταξύ τους απόσταση.

Οι νέες διατομές που σχεδιάστηκαν δεν είχαν τα σωστά υψόμετρα σε σχέση με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Έτσι, διορθώθηκαν όλες οι διατομές ώστε να υπάρχει αντιστοιχία των υψομέτρων στις διατομές του προγράμματος HEC-RAS και στα αντίστοιχα σημεία αυτών στο ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Η διόρθωση έγινε με βάση την διαφορά των υψομέτρων στο πυθμένα του ποταμού.

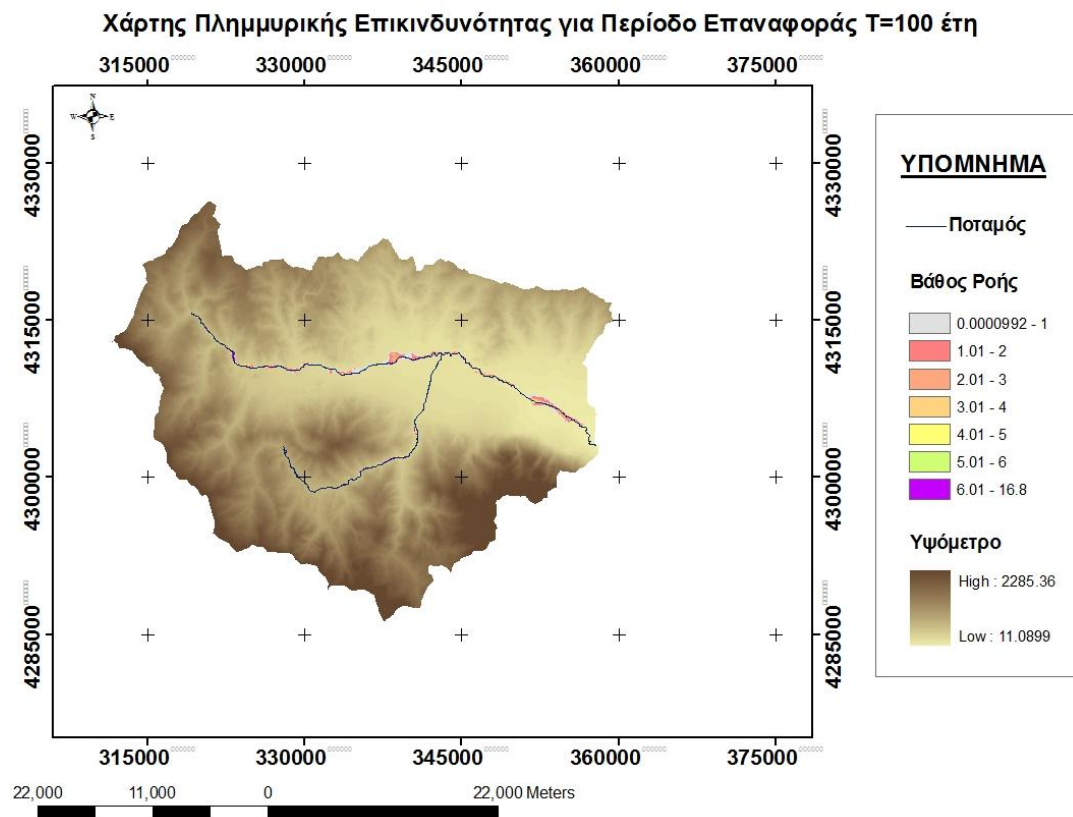
Δημιουργήθηκε, λοιπόν, ένα νέο μοντέλο υδραυλικής προσομοίωσης και αφού ολοκληρώθηκαν οι υπολογισμοί αυτής, εισάχθηκε το μοντέλο στο ArcMap και δημιουργήθηκαν νέοι χάρτες πιεζομετρικών βαθών και πλημμυρικής κατάκλυσης. Η διαδικασία παραγωγής των πλημμυρικών χαρτών αναφέρεται παραπάνω.

Ωστόσο, παρατηρήθηκαν πάλι να υπάρχει υπερεκτίμηση των βαθών ροής σε ορισμένα σημεία του ποταμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κλίση του ποταμού στα σημεία αυτά είναι πολύ έντονη με αποτέλεσμα να χρειάζεται μεγάλη πύκνωση με διατομές σε αυτά. Επίσης, παρατηρείται ότι το ψηφιακό μοντέλο εδάφους δεν είναι πολύ ακριβές σε ορισμένες θέσεις με αποτέλεσμα να εμφανίζονται λάθη κατά τον υπολογισμό των βαθών ροής του ποταμού. Για να αποκατασταθεί το πρόβλημα που εμφανίζεται απαιτείται μεγάλη πύκνωση του ποταμού από διατομές και καλύτερο ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής.

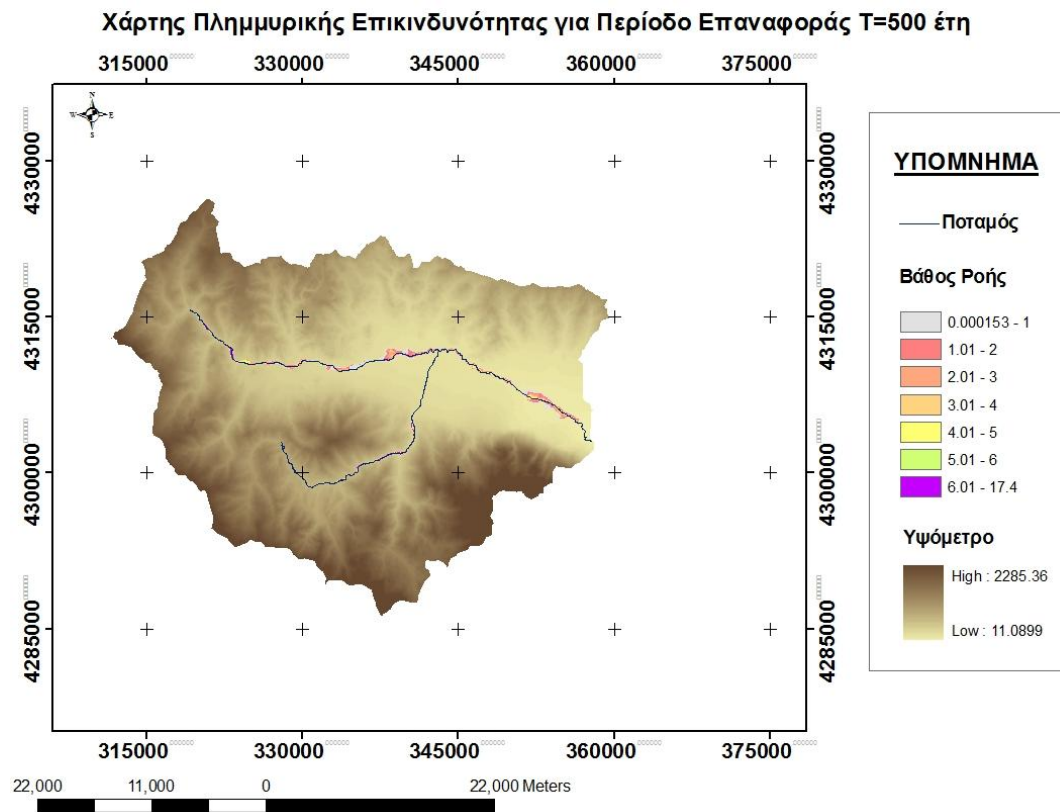
Στους Χάρτες 5.11, 5.12, 5.13 και 5.14 φαίνονται τα πλημμυρικά πεδία για πλημμύρες με περίοδο επαναφοράς  $T=10$ ,  $T=100$ ,  $T=500$  και  $T=1000$  έτη, αντίστοιχα.



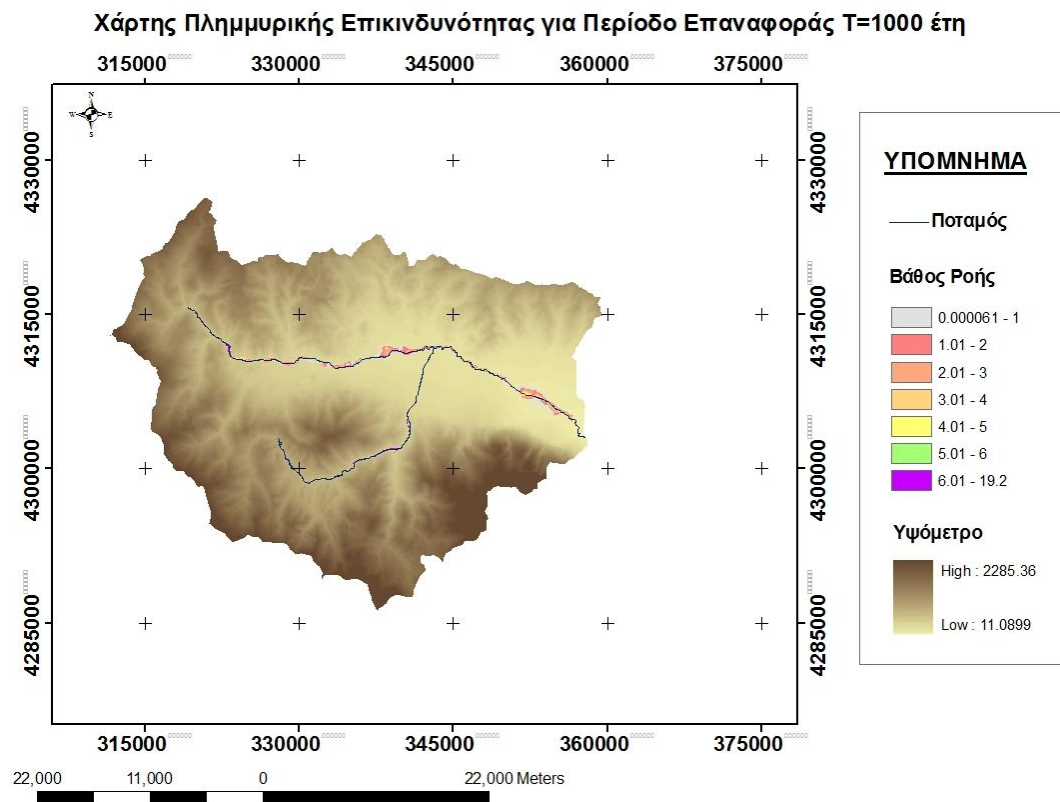
*Χάρτης 5.11: Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας για περίοδο επαναφοράς T=10 έτη.*



*Χάρτης 5.12: Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας για περίοδο επαναφοράς T=100 έτη.*



*Χάρτης 5.13: Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας για περίοδο επαναφοράς T=500 έτη.*



*Χάρτης 5.14: Χάρτης πλημμυρικής επικινδυνότητας για περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη.*

## 6 ΧΑΡΤΕΣ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Στην Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60 γίνεται σαφής αναφορά στις πλημμύρες κινδύνου. Σύμφωνα με αυτή, ως πλημμύρα κινδύνου ορίζεται *ο συνδυασμός της πιθανότητας του πλημμυρικού γεγονότος και οι πιθανές αρνητικές συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον και την οικονομική δραστηριότητα που σχετίζεται με το πλημμυρικό γεγονός* (Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60).

Ως εκ τούτου η Ευρωπαϊκή Οδηγία αναφέρει ότι οι πλημμυρικοί χάρτες κινδύνου περιλαμβάνουν τις πιθανές αρνητικές συνέπειες που συνδέονται με τις πλημμύρες, εκφρασμένες με τους ακόλουθους όρους:

- i. Τον ενδεικτικό αριθμό κατοίκων που ενδέχεται να επηρεαστεί.
- ii. Το είδος των οικονομικών δραστηριοτήτων στην περιοχή που ενδεχομένως να επηρεαστούν.
- iii. Τις εγκαταστάσεις, όπως αναφέρονται στο Παράρτημα I της Οδηγίας του Συμβουλίου 96/61/ΕΕ της 24 Σεπτεμβρίου 1996 σχετικά με την πρόληψη και τον ολοκληρωμένο έλεγχο της ρύπανσης, που πιθανόν να προκαλέσουν τυχαία μόλυνση σε περίπτωση πλημμύρας και ενδεχομένως να επηρεάσουν προστατευόμενες περιοχές όπως αυτές προσδιορίζονται στο Παράρτημα IV (i), (iii) και (v) της Οδηγίας 2000/60/ΕΕ.
- iv. Άλλες πληροφορίες που τα Κράτη Μέλη θεωρούν χρήσιμες, όπως η ένδειξη περιοχών όπου μπορούν να συμβούν πλημμύρες με μεγάλα ποσοστά φερτών ιζημάτων και πλημμύρες που παρασύρουν υπολείμματα αλλά και πληροφορίες για πιθανές άλλες σημαντικές πηγές μόλυνσης.

Στην πραγματικότητα η οδηγία για τις πλημμύρες ζητά περιγραφή μόνο ευπαθών παραμέτρων. Ο κίνδυνος ως εκ τούτου δεν απαιτείται ρητά, αλλά η έννοια του κινδύνου ενυπάρχει.

Η αντιμετώπιση του πλημμυρικού κινδύνου, πχ ο συνδυασμός του κινδύνου και της ευπάθειας-τρωτότητας, είναι περισσότερο πολύπλοκη από την αντιμετώπιση μόνο της επικινδυνότητας. Στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες οι πλημμυρικοί χάρτες κινδύνου και τα συναφή προϊόντα αυτών είναι λιγότερο ανεπτυγμένα από τους χάρτες επικινδυνότητας. Πριν την παρουσίαση του καλού σχεδιασμού των

πλημμυρικών χαρτών κινδύνου, δίνονται μερικά βασικά στοιχεία για τον κίνδυνο και την χαρτογράφηση του.

## 6.2 Η έννοια της επικινδυνότητας και η χαρτογράφησή της

Ο κίνδυνος μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$\text{Risk} = C * Ph \quad (6.1)$$

, όπου

C : η πιθανή αρνητική συνέπεια (λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η έκθεση και η ευπάθεια)

Ph : η πιθανότητα επικίνδυνης διαδικασίας. Ο κίνδυνος εκφράζεται σαν μια πιθανή απώλεια σε μια συγκεκριμένη περιοχή (π.χ. ha, km<sup>2</sup>) εντός μια συγκεκριμένης χρονικής περιόδου (γενικά ενός χρόνου).

Η πιθανή αρνητική συνέπεια μπορεί να εκτιμηθεί από τον ακόλουθο τύπο:

$$C = V * S (m_h) * E \quad (6.2)$$

, όπου V, S και E είναι οι ευπαθείς παράμετροι:

V : η αξία των στοιχείων σε κίνδυνο, εκφρασμένη σε χρήμα ή ανθρώπινη ζωή

S(mh) : ευαισθησία, δηλαδή οι επιζήμιες συνέπειες των στοιχείων κινδύνου (όπως ο βαθμός του μεγέθους του κινδύνου), π.χ. όπως οι καμπύλες βάθους – ζημίας και ζημίας – διάρκειας. Το εύρος ευαισθησίας κυμαίνεται από 0 μέχρι 1.

E : έκθεση, δηλαδή η πιθανότητα του στοιχείου της επικινδυνότητας να εμφανιστεί όταν συμβαίνει το γεγονός. Το εύρος της έκθεσης κυμαίνεται από 0 μέχρι 1.

Οι ακόλουθες πληροφορίες μπορούν να σχεδιαστούν όσον αφορά τον κίνδυνο μιας πλημμύρας με:

- Μία παράμετρο που αναφέρεται στις παρακάτω κατηγορίες:
  - Πληθυσμός: αριθμός ατόμων, ειδικές κατηγορίες κτλ.
  - Οικονομικά περιουσιακά στοιχεία και δραστηριότητα: ιδιωτική περιουσία, υποδομές κτλ αλλά και το είδος της παραγωγής, ο αριθμός της απασχόλησης κτλ.



ο Περιβαλλοντικά προβλήματα: εγκαταστάσεις δυνητικά επιζήμιες για το περιβάλλον.

- Πιθανές αρνητικές συνέπειες (οι ζημιές από πλημμύρα εκφράζονται σε απώλεια ανά μονάδα επιφάνειας) =  $V * S * E$

- Κίνδυνος (απώλεια ανά μονάδα επιφάνειας σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο)

Κατά την παραγωγή αυτού του τύπου των αξιολογήσεων υπάρχει μια σειρά από περιορισμούς. Σύμφωνα με αυτούς, επαναπροσδιορίζονται οι πληροφορίες στους χάρτες. Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

- Οι απαραίτητες πληροφορίες δεν υπάρχουν με την απαιτούμενη ακρίβεια (βασικά στην ζητούμενη κλίμακα)
- Οι πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμη, σε περίπτωση που θεωρείται ότι είναι ευαίσθητη πληροφορία (προστασία της ιδιωτικής ζωής, δηλαδή το δεδομένα δεν είναι δημοσίως διαθέσιμα).
- Οι πληροφορίες δεν είναι διαθέσιμες σε ψηφιακή μορφή.

Ένα σημαντικό σημείο που πρέπει να εξεταστεί σε περίπτωση εξέτασης του κινδύνου είναι ότι ο κίνδυνος, δυστυχώς, δεν παραμένει σταθερός στο χρόνο. Έτσι είναι, συνήθως, απαραίτητο να προβλεφθούν οι αλλαγές στον κίνδυνο μελλοντικά, για να ληφθούν καλύτερες αποφάσεις. Μερικές αιτίες αλλαγής είναι αναγνωρισμένες, όπως για παράδειγμα:

- Οι παράμετροι μπορούν να αλλάξουν ραγδαία.
- Η αύξηση της τρωτότητας ορισμένων παραμέτρων, δηλαδή η ανάπτυξη, η αλλαγή αξιών των περιουσιακών στοιχείων, οι χρήσεις γης, η συμπεριφορά των ανθρώπων κατά τη διάρκεια της πλημμύρας, η δυνατότητα για επανάκαμψη.
- Μείωση της τρωτότητας των παραμέτρων σε περιπτώσεις, όπως δηλαδή η μετεγκατάσταση / μετακίνηση περιουσιακών στοιχείων, η μείωση της ευαισθησίας των περιουσιακών στοιχείων, η βελτιστοποίηση των προειδοποιήσεων για πλημμύρες, η αλλαγή στις χρήσεις γης, η αντιμετώπιση των ανθρώπων κατά τη διάρκεια των πλημμυρών, η δυνατότητα για επανάκαμψη.
- Μόνιμη, ημιμόνιμη ή μη μόνιμη αντιμετώπιση πλημμυρών (αλλοίωση, συντήρηση, νέες κατασκευές).
- Οι επικίνδυνες παράμετροι μπορεί να αλλάξουν λόγω:



- ✓ Του κλίματος (βιοποικιλότητα, κλιματική αλλαγή)
- ✓ Των περιβαλλοντικών αλλαγών (αποψίλωση δασών, αναδάσωση, μείζονες πυρκαγιές δασών)
- ✓ Της διάβρωσης (αλλαγή του γεωλογικού σχηματισμού)
- ✓ Της ανθρώπινης παρέμβασης

### **6.3 Χαρτογράφηση των στοιχείων ενεργητικού υψηλού κινδύνου (χάρτες τρωτότητας)**

Χαρτογράφηση των ενεργητικών υψηλού κινδύνου όπως ζητείται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τις Πλημμύρες σημαίνει παροχή πληροφοριών (παράμετροι τρωτότητας) όπως πληθυσμός, κληρονομικά στοιχεία και οικονομική δραστηριότητα, και περιβαλλοντικά θέματα, δυνητικά επηρεασμένα από μια πλημμύρα.

#### **6.3.1 Περιεχόμενα χαρτών επικινδυνότητας**

Οι χάρτες τρωτότητας εξετάζουν τρεις κατηγορίες που πιθανόν να πληγούν από μια ενδεχόμενη πλημμύρα, τον πληθυσμό, τα περιουσιακά στοιχεία και τις οικονομικές δραστηριότητες και τις δυνητικά επηρεασμένες εγκαταστάσεις που μπορεί να δημιουργήσουν μόλυνση. Αυτές οι κατηγορίες αναλύονται παρακάτω.

##### **➤ Πληθυσμός**

Οι πληροφορίες που καταγράφονται όσον αφορά τον πληθυσμό, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007 / 60 αναφέρονται σε:

- Κατανομή πληθυσμού (είτε κατοίκων ανά δήμο, ταχυδρομικό κώδικα ή διεύθυνση/κατοικία είτε μέσο όρο κατοίκων ανά κατοικία /ιδιότητα)
- Κατανομή συγκεκριμένων ευπαθών ομάδων (κατοικίες για ηλικιωμένους, τοποθεσία σχολείων, νοσοκομείων, αθλητικών κέντρων, άλλων υποδομών συγκέντρωσης πολιτών και τουριστών)
- Κατανομή κτιρίων (ως δείκτη για τον πληγέντα πληθυσμό): Το Νορβηγικό παράδειγμα δείχνει τα κτήρια που πιθανώς έχουν πληγεί από πλημμύρες με

περίοδο επαναφοράς 100 ετών. Επίσης έχουν χαρτογραφηθεί κτήρια με πιθανή ζημιά στα υπόγεια τους.

- Κοινωνική ευαισθησία, που περιγράφεται από το Αγγλικό παράδειγμα. Σε αυτό, η κοινωνική ευαισθησία εκφράζεται χρησιμοποιώντας το SFVI (Social Flood Vulnerability Index) βασισμένο σε τρεις κοινωνικές ομάδες (μακροχρόνιων παθήσεων, μονογονεϊκών οικογενειών και ηλικιωμένων) και τέσσερις οικονομικούς δείκτες (ανεργίας, υπερπληθυσμού, ανθρώπων χωρίς ιδιωτικό μέσο μετακίνησης, άστεγων). Η κοινωνική ευαισθησία χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες: πολύ υψηλή, υψηλή, μέτρια και χαμηλή.
- Οποιαδήποτε άλλη ευπαθής ομάδα που μπορεί να έχει ενδιαφέρον για συγκεκριμένα Κράτη Μέλη.

#### ➤ **Περιουσιακά στοιχεία και οικονομικές δραστηριότητες**

Τα κριτήρια που μπορούν να βοηθήσουν στον προσδιορισμό οικονομικών δραστηριοτήτων που αφορούν την Οδηγία είναι:

- Η κατηγορία που πλήχθηκε από την πλημμύρα, όπως ο τύπος βιομηχανίας και των προϊόντων
- Ο αντίκτυπος των ζημιών στην οικονομία, π.χ. μοναδική τοποθεσία για συγκεκριμένη δραστηριότητα
- Οι καταστροφές στη γεωργία, από γλυκά νερά ή θαλασσινές πλημμύρες.

Υπάρχουν διάφορες ταξινομήσεις για τη χρήση γης και μπορούν να προσαρμοστούν σύμφωνα με:

- Κατοικήσιμες περιοχές : Μητροπόλεις, αστικές περιοχές, αγροτικές περιοχές, χώροι αναψυχής.
- Βασικές υπηρεσίες και υποδομές: Δρόμοι, ηλεκτρική ενέργεια, τηλεφωνία, υγραέριο, αποχέτευση, ύδρευση, νοσοκομεία, σχολεία, πυροσβεστική, σιδηρόδρομος, αθλητικές δραστηριότητες.
- Ειδικές οικονομικές ζώνες: βιομηχανικές, εμπορικές υπηρεσίες.
- Αγροτικές περιοχές, δάση.

Ο τελικός χάρτης κινδύνου πλημμύρας εξυπηρετεί έχοντας ως δεδομένο ότι οι κύριες κατηγορίες χρήσης γης κατακλύζονται από πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς 250 έτη. Οι ακόλουθες κατηγορίες χρησιμοποιούνται για αστικές περιοχές,

βιομηχανικές μονάδες, ασυνεχής αστική περιοχή, αγροτικές περιοχές, κυκλοφοριακές υποδομές (αεροδρόμιο, λιμάνι).

- Το παράδειγμα της Λετονίας χρησιμοποιεί διάφορες κατηγορίες χρήσεων γης για πλημμύρα με περίοδο επαναφοράς 100 ετών.
- Στο παράδειγμα της Δανίας, σημαντικές υποδομές έχουν καλυφθεί από ένα ακραίο πλημμυρικό γεγονός.
- Στη Σαξονία, της Γερμανίας, βασικές υπηρεσίες και υποδομές (νοσοκομεία, ύδρευση και ενέργεια, βασικά βιομηχανικά πάρκα) που έχουν κατακλυστεί από πλημμύρες εμφανίζονται στους πλημμυρικούς χάρτες. Συνεπάγεται τη σοβαρότητα πιθανών πλημμυρικών καταστροφών.
- Στο ιταλικό παράδειγμα, τα περιουσιακά στοιχεία, που εκτέθηκαν σε κίνδυνο, προσδιορίστηκαν αποδίδοντας έναν αριθμητικό συντελεστή για κάθε κατηγορία αυτών (συνεχείς οικιστικές περιοχές, παραγωγικοί τομείς, σχολεία, νοσοκομεία κτλ). Ο αριθμητικός συντελεστής, αποκαλούμενος ως K, παίρνει τιμές λαμβάνοντας υπ' όψιν την αύξηση της πιθανότητας της ανθρώπινης απώλειας σε σχέση με την συγκεκριμένη χρήση των περιουσιακών στοιχείων που υπάρχουν στα πεδία κινδύνου. Η ακρίβεια των χαρτών εξαρτάται από την ακρίβεια της κάλυψης των χρήσεων γης, η οποία στο ιταλικό παράδειγμα απεικονίζεται σε χάρτες κλίμακας 1:10000.

➤ **Εγκαταστάσεις που πιθανόν να προκαλέσουν μόλυνση εάν υποστούν ζημιές από πλημμύρα.**

Μια λίστα από εγκαταστάσεις ενδιαφέροντος σε αυτόν τον τομέα είναι:

- Χημική βιομηχανία και σχετικές αποθήκες,
- Δωλιστήρια και εγκαταστάσεις αποθήκευσης για προϊόντα πετρελαίου
- Σταθμοί θερμοηλεκτρικής ενέργειας: πετρέλαιο, γκάζι, άνθρακας και πυρηνικά
- Σταθμοί καυσίμων και υγραερίου
- Αγροτικές αποθήκες για λιπάσματα, ζιζανιοκτόνα, φυτοφάρμακα, δηλητηριώδεις ουσίες και θρεπτικά
- Ειδικό χώρο απόρριψης για χημικά και βιομηχανικά απόβλητα
- Εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων

Επίσης σημαντικές είναι οι δυνητικές επιπτώσεις από τα αντιπλημμυρικά έργα σε συγκεκριμένα περιβαλλοντικά θέματα όπως:

- Δυνητική καταστροφή στο φυσικό περιβάλλον και την πανίδα
- Μοναδικότητα του φυσικού περιβάλλοντος και σπανιότητα της πανίδας
- Εθνικοί δρυμοί και άλλες προστατευόμενες περιοχές, όπως υγράτοποι, παρθένα δάση κτλ.

### **6.3.2 Χρήση χαρτών**

Οι βασικοί παράγοντες οι οποίοι θα καθορίσουν τις καταστροφές και τους κινδύνους είναι:

- Η διοίκηση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.
- Ο ειδικός για τις πλημμύρες, ο οποίος ασχολείται με τον σχεδιασμό μέτρων αντιμετώπισης πλημμυρών.
- Ο σχεδιασμός χρήσεων γης και διαχείρισης γης
- Σε μικρή κλίμακα (μεγάλες περιοχές): η θέσπιση προτεραιοτήτων

### **6.3.3 Κλίμακα σχεδιασμού των εκτιμήσεων**

Οι χάρτες κινδύνου σχεδιάζονται σε διάφορες κλίμακες ανάλογα με την πληροφορία που περιέχουν. Πιο συγκεκριμένα:

- Η επισκόπηση των πληροφοριών γίνεται σε επίπεδο κοινοτήτων και πόλεων. Σε μεγάλες περιοχές μπορεί να αναπαρασταθεί μόνο ο κατά προσέγγιση πληθυσμός ανά μητρόπολη, κοινότητα ή πόλη. Η κλίμακα είναι της τάξης του 1:100000 με 1:500000 και είναι εφικτή μόνο για μεγάλα πλημμυρικά πεδία. Για ευρεία κλίμακα υποδομών, όπως δρόμοι, σιδηροδρομικά δίκτυα, αγροτικά και δασοκομία μπορούν να χρησιμοποιήσουν μικρές έως μεσαίες κλίμακες (1:100000-1:200000).
- Λεπτομερείς πληροφορίες για μεμονωμένα κτίρια, κοινωνικές δομές ή κοινωνικές ομάδες ή μεμονωμένες δραστηριότητες απαιτούν χάρτες με μεγάλη κλίμακα (1:5000-1:25000, σχέδιο πόλης ή σχέδιο κοινότητας)

## 6.4 Άλλοι τύποι πληροφοριών

Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2007/60 για τις πλημμύρες παρέχει τη δυνατότητα στα κράτη μέλη να σχεδιάσουν κάθε είδους πληροφορία που θεωρείται χρήσιμη.

### 6.4.1 Αντιπλημμυρικά έργα

Τα αντιπλημμυρικά έργα μπορεί να είναι μέρος αυτών των πληροφοριών. Σε χάρτες κινδύνου μπορούν να περιγραφούν τα αντιπλημμυρικά έργα, τα αναχώματα και τα έργα προστασίας.

Όπως αναφέρεται σε απόσπασμα από τον οδηγό των Καλύτερων Πρακτικών Οδηγών στην Πρόληψη, την Προστασία και το Μετριασμό Πλημμυρών (Guide best practices on flood prevention, protection and mitigation), *τα κατασκευαστικά μέτρα (προστατευτικές δομές) θα παραμείνουν σημαντικά στοιχεία και θα έπρεπε πρωτίστως να εστιάσουν στην ανθρώπινη υγεία και προστασία σε πολύτιμα αγαθά και ιδιοκτησίες. Πρέπει να θυμόμαστε ότι η προστασία από τις πλημμύρες δεν είναι ποτέ απόλυτη και ίσως γεννήσει μια λανθασμένη αίσθηση ασφάλειας. Το σχέδιο του υπολειπόμενου κινδύνου περιλαμβανόμενης πιθανής αποτυχίας ή παραβίασης θα έπρεπε γι αυτό το λόγο να λαμβάνεται υπόψη.*

Για την περίπτωση πλημμυρών σε προστατευμένες πλημμυρικές κοίτες χρησιμοποιούνται δύο τύποι λύσεων:

- Η κατάκλυση των πλημμυρικών κοιτών καθορίζεται χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψιν η ύπαρξη αντιπλημμυρικών έργων. Το γεγονός ότι μέρος των πλημμυρικών πεδίων προστατεύονται μπορεί να υποδειχθεί με την επισήμανση της περιοχής.
- Η κατάκλυση των πλημμυρικών κοιτών προσομοιώνεται με την υπόθεση της αστοχίας των αντιπλημμυρικών έργων, εφαρμόζοντας δύο πιθανές προσεγγίσεις :
  - i. Επιλογή του τμήματος παράβασης της αντιπλημμυρικής προστασίας που οδηγούν στη χειρότερο σενάριο (οι παράμετροι παραβίασης καθορίζονται από την κρίση εμπειρογνομόνων, με μετατροπή του πλημμυρικού κύματος σχεδιασμού για το σημείο παραβίασης. Κατά

αυτόν τον τρόπο παρήχθησαν οι χάρτες πλημμυρών στην Ουγγαρία το 1976).

- ii. Πιθανότητα αποτυχίας μοντελοποίησης των αντιπλημμυρικών έργων όπως και των παραμέτρων παραβίασης ως δεδομένα εισόδου σε μοντέλα πλημμύρας, χρησιμοποιώντας ολοκληρωμένη ανάλυση των έργων και των θεμελίων εδάφους (μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απαίτηση υψηλού επιπέδου δεδομένων)
- Η πλημμύρα που προήλθε από την παραβίαση καθορίζεται από δισδιάστατα υδροδυναμικά μοντέλα, με παραμέτρους επικινδυνότητας οι οποίες προέρχονται από την προσομοίωση: κατάκλυση πλημμύρας, βάθος πλημμύρας, ταχύτητα διανομής, ταχύτητα μετώπου πλημμύρας (ως δεδομένα εισόδου στα υλικοτεχνικά μοντέλα εντοπισμού / περιορισμού, εκκένωσης). Στις περισσότερες περιπτώσεις ένωσης μοντέλων μονοδιάστατης ροής ποταμού και δισδιάστατης επιφανειακής ροής είναι αναγκαία η αποδοχή της υδραυλικής αλληλεπίδρασης του ποταμού και την πλημμυρικής κοίτης.

#### 6.4.2 Καταστροφές από πλημμύρες

Ο χάρτης ζημιών από τις πλημμύρες αντιπροσωπεύει την πιθανή ζημιά που προκαλείται από μια συγκεκριμένη πλημμύρα (που αναφέρεται σε συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς) και δίνει τον αριθμό των θυμάτων ή ζημιών (σε ευρώ) ανά μονάδα γης. Μια μορφή παρουσίασης μπορεί να είναι η ένδειξη ενός βαθμού κινδύνου για μια δεδομένη τοποθεσία / πόλη, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μεγέθη συμβόλων, όπως ράβδων ή κύκλων, όπου θα φαίνονται οι διαφορετικοί βαθμοί κινδύνου.

##### ➤ Περιεχόμενα χαρτών

Εντός της έκτασης της πλημμύρας δίνεται:

- Ενδεχόμενη ζημιά για μια ακραίο γεγονός σε ευρώ / m<sup>2</sup> (παράδειγμα Sachsen, Γερμανίας). Η χρήση γης έχει ταξινομηθεί και μια συγκεκριμένη ζημιά ανά m<sup>2</sup> κατηγοριοποιείται και κοστολογείται σε:
  - ✓ Βιομηχανική περιοχή: μέτρια (<10 € / m<sup>2</sup>) και υψηλή (>10 € / m<sup>2</sup>)

- ✓ Κατοικημένη περιοχή: χαμηλή (<10 € / m<sup>2</sup>), μέτρια (10 - 50 € / m<sup>2</sup>), υψηλή (>50 € / m<sup>2</sup>)
- ✓ Γεωργικές καλλιέργειες και άλλες χρήσεις γης
- Στη Βάδη-Βυρτεμβέργη, Γερμανίας, μια λεπτομερής ανάλυση των διαφόρων χρήσεων γης (ειδικά στη βιομηχανία, στο εμπόριο και στη στέγαση) σε συνδυασμό με την ευαισθησία στις πλημμύρες παρέχει την ευκαιρία για τον προσδιορισμό των ζημιών από τις πλημμύρες κατά μήκος του Δούναβη και την ανάπτυξη χαρτών κινδύνου πλημμύρας.
- Η πιθανή ζημία (σε εκατ. ευρώ ανά εκτάριο) για ένα συγκεκριμένο γεγονός, πχ το σπάσιμο αναχωμάτων κατά μήκος της ακτογραμμής στην Ολλανδία. Η κλίμακα είναι μη-γραμμική
- Στην Ιταλία, οι υδραυλικοί κίνδυνοι κατηγοριοποιούνται σε τρεις τάξεις κινδύνου, οι οποίες αντιστοιχούν στις περιόδους επαναφοράς των πλημμυρών. Από τον συνδυασμό των κινδύνων και της τρωτότητας των περιουσιακών στοιχείων που εκτίθενται, προέκυψαν οι περιοχές που διατρέχουν κίνδυνο και αποτυπώθηκαν στο χάρτη, σε τέσσερα επίπεδα κινδύνου. Οι χάρτες σχεδιάζονται με κλίμακα 1:10.000. Μπορεί, επίσης, να σχεδιασθεί ένας απλοποιημένος χάρτης επικινδυνότητας, χωρίς να παρέχει οικονομικές - ποσοτικές πληροφορίες, όπως έγινε στην περίπτωση της λεκάνης απορροής ποταμού Τίβερη.
- Επικινδυνότητα σε μια λεπτομερή (μη γραμμικές) κλίμακα, όπως αναφέρεται στο παράδειγμα του Βελγίου.
- Χάρτης επικινδυνότητας, όπως παρουσιάζεται και στο ισπανικό παράδειγμα.

### ➤ Χρήση χαρτών

Οι χάρτες χρησιμοποιούνται για τους εξής σκοπούς:

- Διαχείριση του κινδύνου πλημμυρών και λήψη αποφάσεων: Πού είναι ο μεγαλύτερος κίνδυνος; Καθορισμός προτεραιοτήτων για τη λήψη μέτρων.
- Διαχείριση του κινδύνου πλημμυρών, σχεδιασμός: Επιλογή των καλύτερων παραγόντων και το εύρος των μέτρων για τη μείωση των κινδύνων πλημμύρας όπως ο χωροταξικός σχεδιασμός και ο έλεγχος της ανάπτυξης (αποφυγή), η διαχείριση περιουσιακών στοιχείων του συστήματος (αποθηκευτικούς χώρους

από τις πλημμύρες, διαχείριση των οδών των ποταμών, εκβολές ποταμών και ακτές), η προετοιμασία των πλημμυρών (ανίχνευση πλημμύρας, πρόγνωση, σχεδιασμός έκτακτης ανάγκης) και τα σχέδια διαχείρισης συμβάντων και αντίδρασης (προειδοποίηση για πλημμύρες, ενέργειες των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης, παροχών υγειονομικής περίθαλψης και των αρχών διαχείρισης των κινδύνων πλημμύρας, κοινό, οργανώσεις στήριξης της κοινότητας), και η ανάκτηση (ασφάλιση, τοπικές αρχές, εκ νέου κατασκευή).

- Διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και κρίσεων σε εθνικό / τοπικό επίπεδο: ο αριθμός των ατόμων που εμπλέκονται, η διαδρομή εκκένωσης, τα ασφαλή λιμάνια / προσωρινά κέντρα καταφυγίων, τα σχέδια δράσης των νοσοκομείων, η διακοπή των μεταφορών (δρόμοι και σιδηροδρομικές γραμμές).

#### ➤ **Εκτίμηση κλίμακας σχεδιασμού**

Η κλίμακα των χαρτών πλημμυρικού κινδύνου εξαρτάται από το πόσο αναλυτικές πρέπει να είναι οι πληροφορίες που απαιτούνται. Οι χάρτες συνήθως έχουν μεγάλη κλίμακα που κυμαίνεται από 1:5000 έως 1:25000. Για τις περιοχές όπου οι πλημμύρες καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση, όπως γίνεται στις Κάτω Χώρες, χρειάζεται λιγότερο λεπτομερής πληροφορία και είναι δυνατόν να σχεδιαστούν χάρτες σε κλίμακα 1:250000.

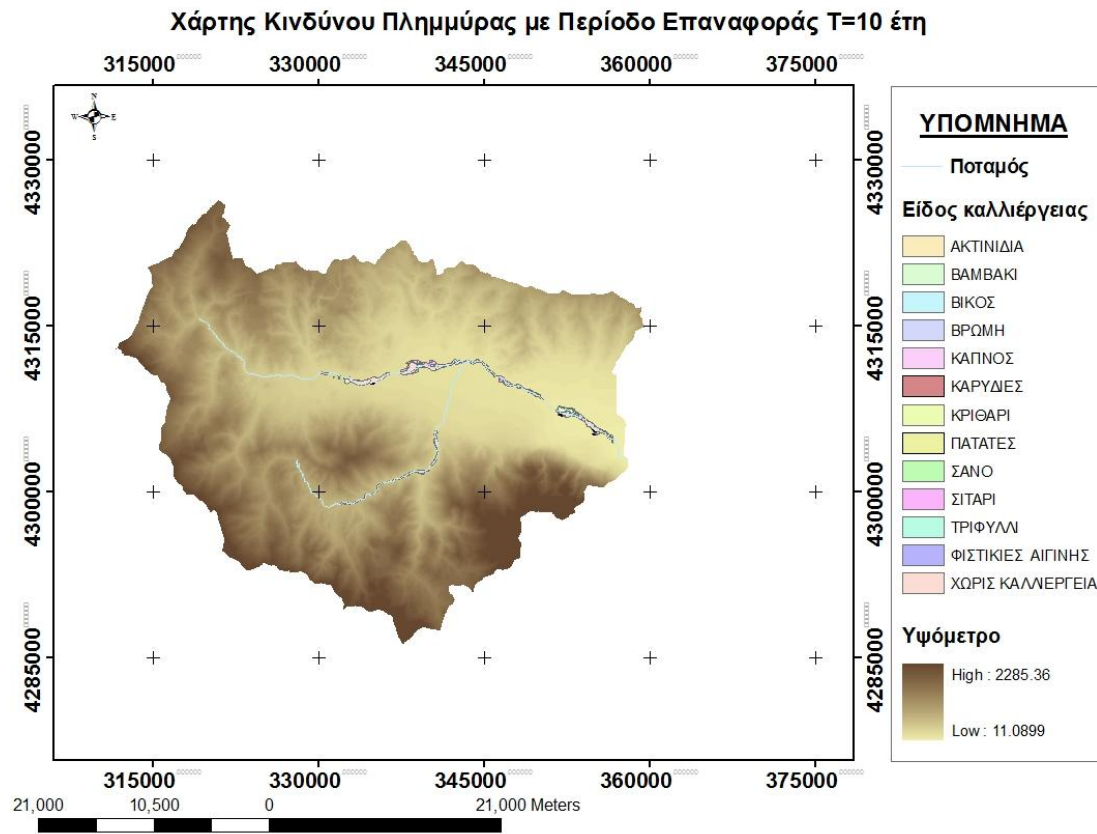
### **6.5 Σύνθεση χαρτών κινδύνου πλημμύρας στην περιοχή μελέτης**

Η σύνθεση των χαρτών κινδύνου πλημμύρας υλοποιείται με τον συνδυασμό της πλημμυρικής κατάκλυσης, όπως αυτή προέκυψε παραπάνω, με τον χάρτη χρήσεων γης. Με τον τρόπο αυτό, υπολογίζονται οι πιθανές ζημιές που προκλήθηκαν από συγκεκριμένη πλημμύρα.

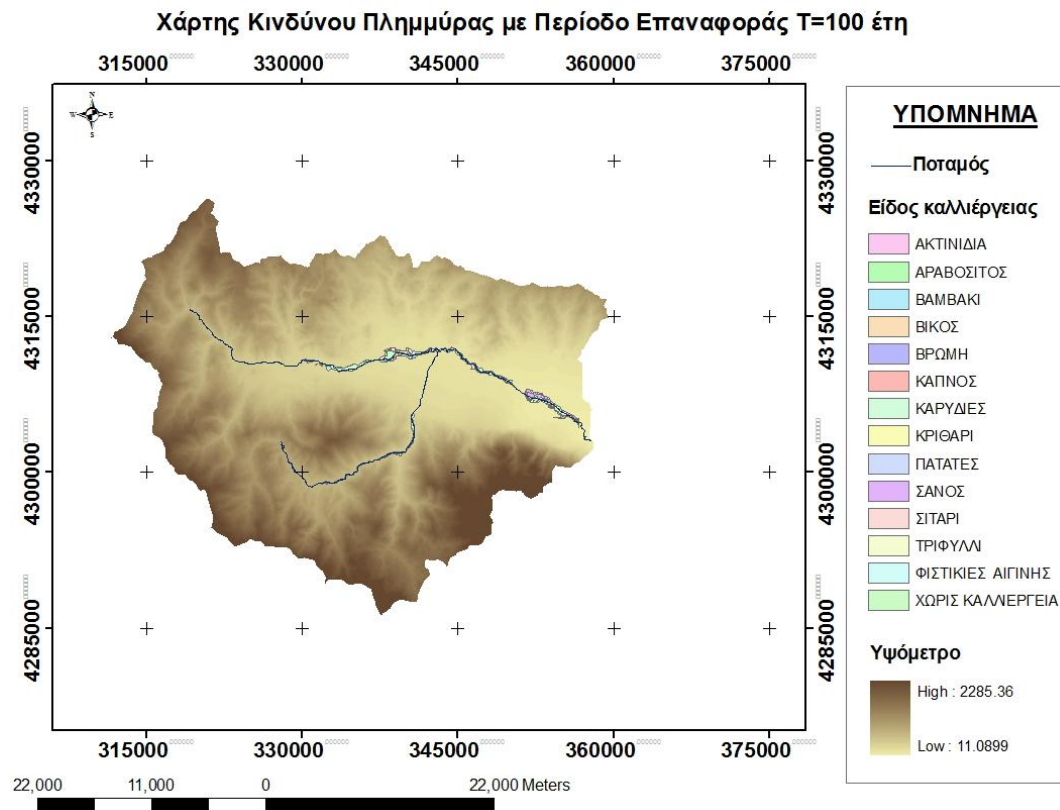
Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται με τη βοήθεια των εργαλείων του ArcMap. Τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνθεση των χαρτών κινδύνου είναι το αρχείο της πλημμυρικής κατάκλυσης σε διανυσματική (vector) μορφή και ο χάρτης ειδών καλλιέργειας του Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε, αφού στην περιοχή μελέτης υπάρχουν κατά κύριο λόγο καλλιεργήσιμες εκτάσεις με απουσία ανθρώπινων κατασκευών.



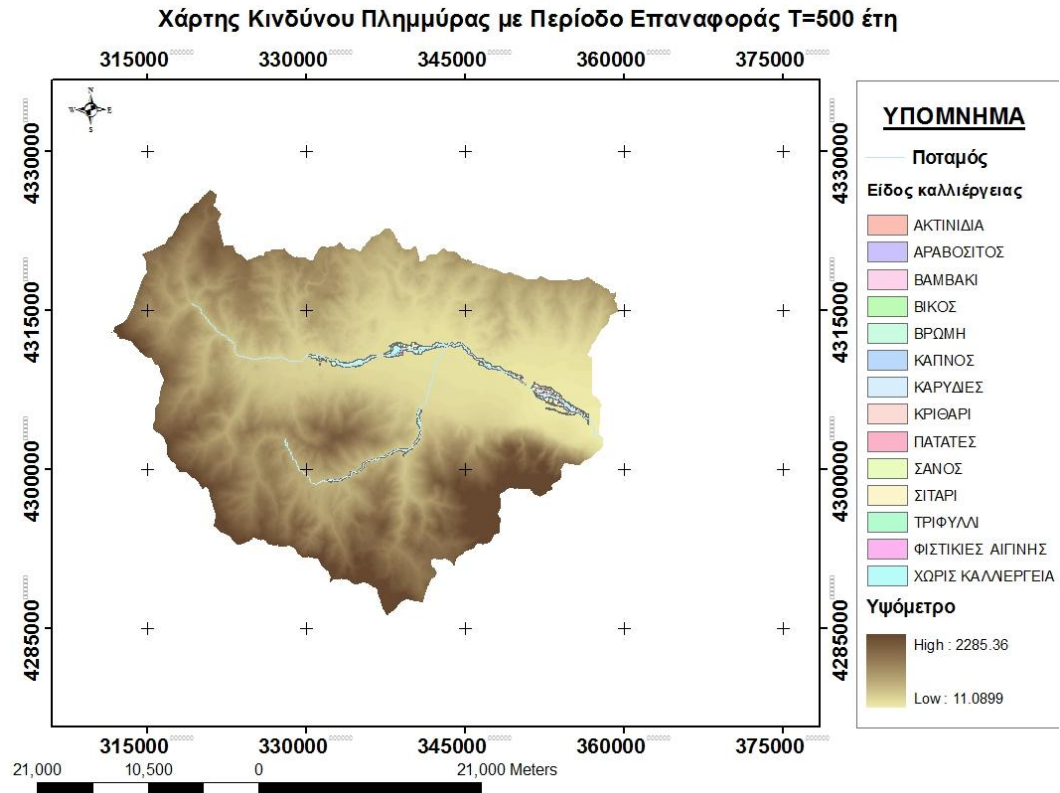
Οι Χάρτες 6.1, 6.2, 6.3 και 6.4 αποτελούν χάρτες κινδύνου πλημμύρας της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού για περίοδο επαναφοράς  $T=10$ ,  $T=100$ ,  $T=500$  και  $T=1000$  έτη.



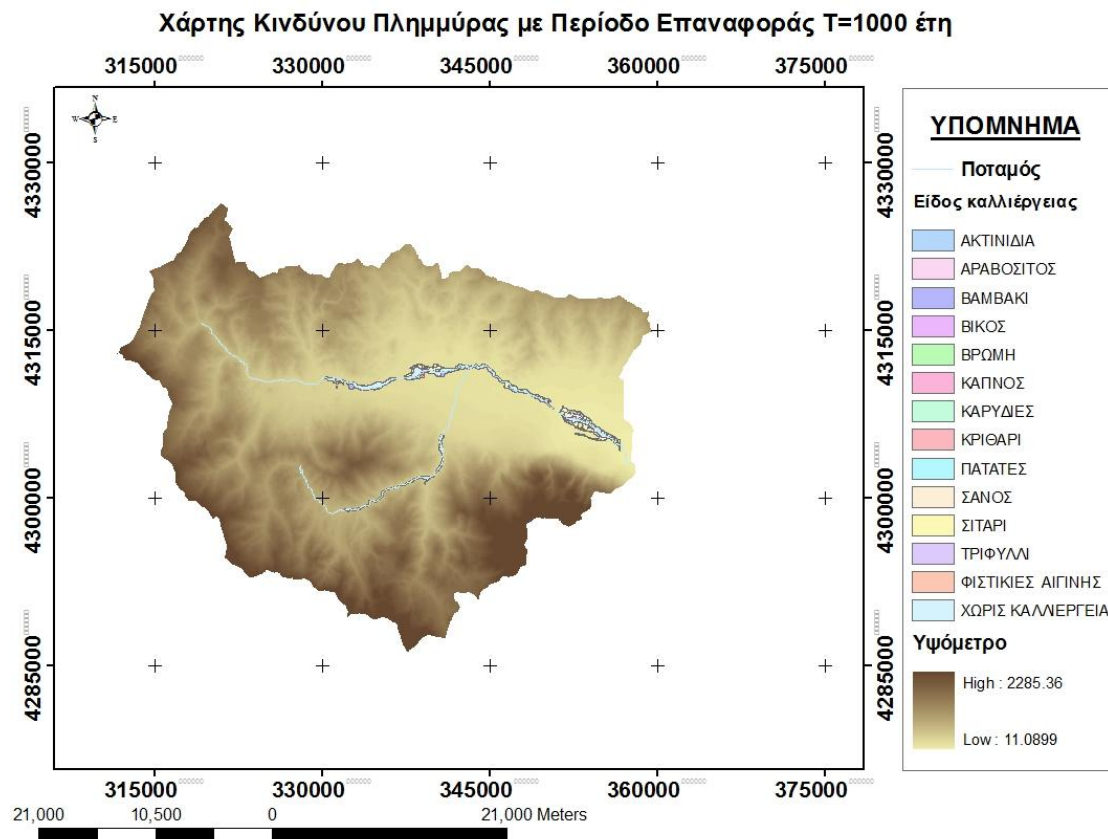
*Χάρτης 6.1: Χάρτες κινδύνου πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς  $T=10$  έτη.*



Χάρτης 6.2: Χάρτες κινδύνου πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς T=100 έτη.



Χάρτης 6.1: Χάρτες κινδύνου πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς T=500 έτη.



*Χάρτης 6.2: Χάρτες κινδύνου πλημμύρας με περίοδο επαναφοράς T=1000 έτη.*

Από τα παραπάνω σενάρια πλημμύρων κατακλύστηκαν καλλιεργήσιμες εκτάσεις όπου τα είδη αυτών και οι αντίστοιχες εκτάσεις τους φαίνονται στον Πίνακα 6.1

Πίνακας 6.1: Είδη καλλιέργειας και οι εκτάσεις αυτών που πλημμύρισαν από πλημμύρες με περίοδο επαναφοράς T=10, T=100, T=500 και T=1000 έτη.

ΕΙΔΟΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ	Έκταση (m <sup>2</sup> )			
	T=10	T=100	T=500	T=1000
<b>ΧΩΡΙΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ</b>	7055209.00	7813098.00	8265722.00	8913338.00
<b>ΒΙΚΟΣ</b>	455758.00	609952.00	759986.00	856900.00
<b>ΤΡΙΦΥΛΛΙ</b>	71992.80	76946.63	96788.40	112319.60
<b>ΚΑΠΝΟΣ</b>	86081.30	145677.00	182406.00	182406.00
<b>ΒΡΩΜΗ</b>	6635.45	7564.45	12128.60	12128.60
<b>ΚΡΙΘΑΡΙ</b>	0.16	56.34	204.63	204.63
<b>ΣΙΤΑΡΙ</b>	956674.73	1361167.12	1770265.09	2053103.36
<b>ΒΑΜΒΑΚΙ</b>	931694.00	1271290.00	1563640.00	1902720.00
<b>ΣΑΝΟ</b>	46699.40	87624.35	111711.25	165027.21
<b>ΠΑΤΑΤΕΣ</b>	19596.70	27595.50	33235.20	38433.00
<b>ΑΡΑΒΙΣΤΟΣ</b>	373285.00	476203.00	585491.00	663643.00
<b>ΚΑΡΥΔΙΕΣ</b>	37607.00	49192.90	55024.10	56967.40
<b>ΑΚΤΙΝΙΔΙΑ</b>	75.63	1912.43	4870.38	6005.88
<b>ΦΙΣΤΙΚΙΕΣ ΑΙΓΙΝΗΣ</b>	428644.00	470180.00	493109.00	501846.00

Όπως, φαίνεται και στον Πίνακα 6.1, η περιοχή μελέτης καλύπτεται κυρίως από καλλιέργειες σιτηρών. Η επίδραση του νερού σε αυτές τις καλλιέργειες εξαρτάται από την περίοδο που θα συμβούν, τον χρόνο παραμονής του νερού στις καλλιέργειες αλλά και από τον τρόπο εισροής του νερού σε αυτές.

Πιο συγκεκριμένα, η παραμονή του νερού μέσα στον αγρό για πολλές μέρες έχει ως συνέπεια το θάνατο του ριζικού συστήματος των σιτηρών. Αν, ωστόσο, τα σιτηρά βρίσκονται στο στάδιο του αδελφώματος αντέχουν στο νερό 12 – 14 μέρες. Η πλημμύρα στο στάδιο πριν την γονιμοποίηση μπορεί να μην οδηγήσει στη νέκρωση των φυτών αλλά σε κενούς στάχεις (λευκούς / αγονιμοποίητους).

Αν η κατάκλυση την περιοχής που βρίσκεται η καλλιέργεια βίαια, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, μπορεί να παρασυρθεί τμήμα αυτής.

Τέλος, αν με την πλημμύρα μεταφερθούν και φερτά υλικά και λάσπη στον αγρό, μπορεί να σκεπαστούν τα φυτά από αυτά με άμεση συνέπεια τη νέκρωσή τους (Μπουρλής, 2009).

## 7 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1 Υδρολογική προσομοίωση

Η υδρολογική προσομοίωση της ανάντη λεκάνης του Σπερχειού έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος HEC-HMS. Η προεπεξεργασία των δεδομένων της υδραυλικής προσομοίωσης ολοκληρώθηκε σε περιβάλλον ArcGIS με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης HEC-GeoHMS.

Ορίζεται η γεωμετρία και η τοπογραφία της λεκάνης απορροής και του υδρογραφικού δικτύου μέσω του HEC-GeoHMS με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης. Το υδρολογικό αυτό μοντέλο αποτελεί αρχείου εισόδου στο HEC-HMS όπου και εκτελείται η προσομοίωση. Η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης απορροής αναπαρίσταται με την επιλογή προτύπων απωλειών βροχής και απορροής. Για την προσομοίωση του μηχανισμού των απωλειών επιλέχθηκε η μέθοδος SCS, λόγω έλλειψης δεδομένων. Η εκτίμηση του συντελεστή CN έγινε βάσει των χαρτών χρήσεων γης και γεωλογίας που ήταν διαθέσιμοι. Για τον υπολογισμό της άμεση απορροής επιλέχθηκε το σύνθετο μοναδιαίο υδρογράφημα, μια παραλλαγή του μοναδιαίου υδρογραφήματος του Βρετανικού Ινστιτούτου Υδρολογίας, με χρονικό βήμα της καταιγίδας σχεδιασμού ίσο με 30 min. για την βασική ροή δεν επιλέχθηκε κάποια μέθοδος αφού δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για τη διόδευση πλημμύρας αρχικά επιλέχθηκε η απλουστευμένη μέθοδος Lag.

Με την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης λαμβάνονται ως αποτελέσματα τα πλημμυρογραφήματα των υπολεκανών και του σημείου εξόδου της υπό εξέταση λεκάνης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τον συνδυασμό των παραπάνω προτύπων δεν ήταν ικανοποιητικά. Παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές τόσο στην αιχμή πλημμύρας όσο και στον αντίστοιχο όγκο πλημμύρας.

Θεωρήθηκε, λοιπόν, σκόπιμο να εξεταστούν διάφορα σενάρια βαθμονόμησης του μοντέλου. Τα δύο πρώτα σενάρια αφορούσαν τη μείωση του συντελεστή CN κατά 15% και 30% αντίστοιχα. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατηρήθηκε μείωση της παροχής αιχμής και του όγκου πλημμύρας. Ωστόσο, η μείωση αυτή ήταν πολύ μικρή και για τα δύο σενάρια, γεγονός που δείχνει ότι το μοντέλο δεν παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις τιμές του συντελεστή CN.

Έτσι, σαν τρίτο σενάριο επιλέχθηκε η μείωση του συντελεστή CN κατά 30% και η αλλαγή προτύπου διόδευσης. Σύμφωνα με τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για την περιοχή μελέτης, επιλέχθηκε ως μέθοδος διόδευσης η Muskingum. Τα αποτελέσματα του σεναρίου αυτού ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Παρατηρήθηκε μεγάλη μείωση της παροχής αιχμής, γεγονός που υποδεικνύει μεγάλη ευαισθησία του μοντέλου στην επιλογή προτύπου διόδευσης για τον υπολογισμό της παροχής αιχμής. Τα αποτελέσματα αυτά, θα αποτελέσουν και τα αρχεία εισόδου στην υδραυλική προσομοίωση του ποταμού.

## **7.2 Υδραυλική προσομοίωση**

Για την υδραυλική προσομοίωση επιλέχθηκε ένα τμήμα του ποταμού που αποτελείται από ποταμούς μέχρι δεύτερης τάξης. Επιλέχθηκε, λοιπόν, μια απλοποιημένη μορφή του ποταμού για ευκολότερη υδραυλική επίλυση του μοντέλου, αφού η παρούσα εργασία εστιάζει στην μεθοδολογία της υδραυλικής προσομοίωσης. Η διαδικασία της υδραυλικής προσομοίωσης ξεκινά με την προεπεξεργασία των αρχικών δεδομένων, με σκοπό τον προσδιορισμό των γεωμετρικών στοιχείων του υπό εξέταση τμήματος του ποταμού, και ολοκληρώνεται με την εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών που έχουν ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό της πιεζομετρικής επιφάνειας και κατ' επέκταση την περιοχή κατάκλυσης της πλημμύρας που εξετάζεται.

Ένα πρόβλημα που εμφανίστηκε κατά το σχεδιασμό του υδραυλικού μοντέλου αφορούσε την ακριβή αποτύπωση της κοίτης. Λόγω ελλιπής πληροφορίας του TIN και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους, απ όπου και προήλθε το TIN, σε ορισμένα σημεία δεν αποδίδεται επαρκώς η διατομή του εδάφους σε καθορισμένες θέσεις του ποταμού. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τοπογραφική αποτύπωση των συγκεκριμένων διατομών. Στην παρούσα εργασία κάτι τέτοιο δεν ήταν εφικτό, με αποτέλεσμα να ελέγχονται διάφορες θέσεις διατομών, έτσι ώστε να περιέχουν λιγότερα εσφαλμένα υψόμετρα, αλλά και διόρθωση των υψομέτρων βάσει του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Επίσης παρατηρήθηκε μετακίνηση της κοίτης σε ορισμένες διατομές προς τα δεξιά ως προς τη διαφορά του ποταμού, με αποτέλεσμα την μετακίνηση των διατομών ώστε το χαμηλότερο υψομετρικά σημείο να συμπίπτει με τον πυθμένα του ποταμού.

Κατά την εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών το HEC-RAS υπολογίζει το πιεζομετρικό φορτίο στις περιοχές που δεν υπάρχουν διατομές με γραμμική παρεμβολή των διαδοχικών διατομών που το περικλείουν. Έτσι, για την καλύτερη αποτύπωση του ακριβούς οριζοντιογραφικού σχήματος του τμήματος του ποταμού απαιτούνται περισσότερες διατομές, και κυρίως σε περιοχές όπου το ποτάμι σχηματίζει μεγάλη καμπύλη.

Στην περίπτωση της μόνιμης ροής εισάγεται η παροχή αιχμής για κάθε διατομή που έχει επιλεγεί για την υδραυλική προσομοίωση.

### **7.3 Σύνθεση χαρτών πλημμύρας**

Με τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης μπορεί να επιτευχθεί η σύνθεση των χαρτών πλημμύρας. Αυτό, ολοκληρώνεται σε περιβάλλον Arc-GIS με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης του HEC-GeoRAS. Ως δεδομένα εισόδου είναι τα στοιχεία της υδραυλικής προσομοίωσης και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Η διαδικασία παραγωγής χαρτών πλημμύρας έγινε και για τις τέσσερις περιόδους επαναφοράς (10, 100, 500 και 1000 έτη). Δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στην έκταση της πλημμύρας για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην μικρή ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης, το πλημμυρικό πεδίο είναι ευρύτερο στις περιοχές που είναι πιο επίπεδες και παρατηρείται διευρυμένη κοίτη ποταμού.

### **7.4 Χάρτες κινδύνου πλημμύρας**

Οι χάρτες κινδύνου πλημμύρας προκύπτουν με τον συνδυασμό των πολυγώνων των πλημμυρικών κατακλύσεων με τον χάρτη χρήσεων γης της περιοχής. Επειδή η περιοχή που εξετάζεται καλύπτεται κατά κύριο λόγο από καλλιεργήσιμες εκτάσεις αντί για τον χάρτη χρήσεων γης χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης ειδών καλλιέργειας που διατίθεται από τον Οργανισμό Πληρωμών και Κοινοτικών Ενισχύσεων Προσανατολισμού και Εγγυήσεων (Ο.Π.Ε.Κ.Ε.Π.Ε.). έτσι, γίνεται μια εκτίμηση της ζημιάς από την κάθε πλημμύρα που εξετάζεται, υπολογίζοντας την έκταση κάθε καλλιέργεια που κατακλύζεται από τα νερά της πλημμύρας.

Ωστόσο, δεν υπήρχε πληροφορία για ανθρώπινες κατασκευές, όπως δρόμοι, γέφυρες και αγροκατοικίες με αποτέλεσμα να μπορεί να εκτιμηθεί η ακριβής ζημιά στην περιοχή όσον αφορά τις ανθρωπογενείς κατασκευές και τα περιουσιακά στοιχεία όπως ορίζει η Οδηγία 2007 / 60 / ΕΕ.

## **7.5 Αξιολόγηση λογισμικού**

Όπως προαναφέρθηκε, τα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της υδρολογικής και υδραυλικής προσομοίωσης είναι το HEC-HMS και HEC-RAS, αντίστοιχα. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν ένα ελεύθερο λογισμικό που είναι διαθέσιμα για κάθε χρήστη χωρίς κόστος. Τα αποτελέσματα που δίνουν είναι αρκετά ικανοποιητικά, παρότι παρατηρείται μικρή υπερεκτίμηση των τιμών των αποτελεσμάτων. Είναι εύχρηστα εργαλεία και τα αντίστοιχα εγχειρίδια που διατίθενται μέσω της ιστοσελίδας του HEC δίνουν αρκετές πληροφορίες ως προς την διαδικασία εκτέλεσης των προσομοιώσεων. Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετές ελλείψεις με αποτέλεσμα την αναζήτηση πληροφοριών σε άλλους διαδικτυακούς τόπους.

Επίσης, για την ευκολότερη χρήση των εργαλείων HEC-GeoHMS και HEC-GeoRAS, απαιτείται η γνώση του προγράμματος του ArcMap. Μπορεί να αποτελεί ξεχωριστή εργαλειοθήκη σε αυτό αλλά κατά την προεπεξεργασία των δεδομένων ή την σύνθεση των πλημμυρικών χαρτών χρησιμοποιούνται και άλλα εργαλεία το ArcGIS.

Συμπερασματικά, τα λογισμικό πακέτο του HEC προτείνεται για χρήση στην περίπτωση υπολογισμού πλημμυρικών πεδίων και σύνθεση χαρτών, γιατί αποτελεί ένα οικονομικό, εύχρηστο και αξιόπιστο εργαλείο προσομοίωσης.

## **7.6 Προτάσεις μετεξέλιξης της παρούσας εργασίας**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την υδρολογική προσομοίωση επιλέχθηκε ένας συνδυασμός προτύπων για την εκτέλεση των υπολογισμών της προσομοίωσης. Το πρόγραμμα της υδρολογικής προσομοίωσης δίνει ένα εύρος επιλογών για τον υπολογισμό του προτύπου των απωλειών, της άμεσης απορροής και της μεθόδου διόδευσης. Η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού των προτύπων για την απλουστευμένη περιγραφή του υδρολογικού κύκλου εξαρτάται από τα διαθέσιμα



στοιχεία τα οποία υπάρχουν για την περιοχή μελέτης. Έτσι, προτείνεται η διερεύνηση και η εφαρμογή άλλου συνδυασμού προτύπου και η σύγκρισή του, τελικώς, με αυτόν που επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία.

Η εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας και χαρτών κινδύνου αποτελούν, σύμφωνα με την Οδηγία 2007 / 60 / ΕΕ το δεύτερο στάδιο για την αξιολόγηση και της διαχείριση της πλημμύρας. Επομένως, μια αναμενόμενη και χρήσιμη εξέλιξη της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η εκπόνηση ενός σχεδίου διαχείρισης της πλημμύρας για την πρόληψη και την ελαχιστοποίηση των πιθανών ζημιών που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6. Επίσης, προτείνεται μια λεπτομερέστερη καταγραφή των ζημιών, συμπεριλαμβάνοντας και πιθανές ανθρωπογενείς κατασκευές που μπορεί να υπάρχουν στην περιοχή και κατ' επέκταση μια οικονομική ανάλυση των ολικών ζημιών που θα προκληθούν από την πλημμύρα.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

Γκιόκας Α., 2009, *Κατάρτιση Μεθοδολογικού Πλαισίου για την Εκπόνηση Χαρτών Πλημμύρας*, Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων”, Αθήνα.

ΕΚ (2007), ΟΔΗΓΙΑ 2007 / 60 / ΕΚ για την αξιολόγηση και τη διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας.

Ευστρατιάδης Δ., Ρόζος Ε., Κουκουβίνος Α., 2009, *ΥΔΡΟΓΕΙΟΣ – Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης, Θεωρητική τεκμηρίωση*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών - Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, Αθήνα.

Κακαβάς Ν. Ι., 1984, *Υδρολογικό Ισοζύγιο της Λεκάνης Απορροής του Σπερχειού ποταμου*, Διδακτορική Διατριβή, Ινστιτούτο Γεωλογικών Μελετών και Ερευνών, Αθήνα.

Κουτσογιάννης Δ., Ξανθόπουλος Θ., 1999, *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών - Τομέας Υδάτινων Πόρων, Αθήνα.

Κουτσογιάννης Δ. , 2003, *Υδρολογική Μελέτη Σπερχειού*, Αθήνα.

Κουτσογιάννης Δ., Τσακαλίας Γ., 1995, *Υδρολογικά Χαρακτηριστικά της Λεκάνης Σπερχειού*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Υδάτινων Πόρων και Θαλάσσιων Έργων, Αθήνα.

Κουτσόπουλος Κ., 2009, *Πραγματεία Ανάλυσης Χωρου*, τόμος Α΄: Θεωρία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.

Μιμίκου Μ. και Μπάλτας Ε., 2003, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 297 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Μίσθου Μ. Λ., 2006, *Ανάλυση Μορφομετρικών Παραμέτρων Υδρολογικής Λεκάνης με χρήση GIS*, Πτυχιακή Εργασία Χαροκόπειου Πανεπιστημίου, Τμήμα Γεωγραφίας, Αθήνα.

Μπουρλής Ε., 2009, *Χάρτες Κινδύνων Πλημμύρας Σύμφωνα με την Οδηγία 2007 / 60 της Ε.Ε. – Εφαρμογή στον Πηνειό Ποταμό*, Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων”, Αθήνα

Παγανά Β., 2012, *Κατάρτιση Χαρτών Πλημμύρας στην Περιοχή της Ραφήνας*, Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων”, Αθήνα.

Παπανικολάου Π., 2008, *Ανοικτοί Αγωγοί*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Σημειώσεις μαθήματος Υδραυλική – Ανοικτοί Αγωγοί, Αθήνα.

Τερζίδης Γ.Α., 1997, *Εφαρμοσμένη Υδραυλική*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Τουτζιάρη Μ., 2012, *Υλοποίηση Μεθοδολογικού Πλαισίου για την Κατάρτιση Χαρτών Πλημμύρας- Εφαρμογή στον Σαρανταπόταμο Ελευσίνας*, Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων”, Αθήνα.

Τσακίρης Γ., 1995, *Υδάτινοι Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Τσιούμας Β., Ζοράπας Β., 2010, *Υδρογεωλογική Μελέτη – Υδατικό Διαμέρισμα Αν. Ελλάδος (δυτ. 07)*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών – Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Υδρογεωλογίας, Αθήνα.

Ψωμιάδης Ε., 2010, *Έρευνα Γεωμορφολογικών και Περιβαλλοντικών Μεταβολών στην Υδρολογική Λεκάνη του Σπερχειού Ποταμού με Χρήση Νέων Τεχνολογιών*, Διδακτορική Διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα.

### **Ξένη Βιβλιογραφία**

Bedient P., Huber W., 1992, *Hydrology and Floodplain Analysis*, Addison – Wesley, New York.

Bruner, G., 2008a. *HEC-RAS, river analysis system user's manual*, US Army corps of Engineers, Hydrologic engineering center.

Brunel G., 2008b, *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*, US Army corps of Engineers, Hydrology engineering center.

Cameron, T. and Ackerman, P.E., 2011. *HEC-GeoRAS, GIS tools for support of HEC-RAS using ArcGIS*.

Chang K., 2003, *Introduction to Geographic Information System*, International Edition: McGraw – Hill.

DeMers N. M., 2000a, *Fundamental of Geographic Information System*, John Wiley and Sons, N. York 2000a

European exchange circle on flood mapping, 2007, *Handbook on Good Practices for Flood Mapping in Europe*, E.U.

Fleming, M. and Doan, J., 2010. *HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, version 5.0.*, McCarthy, GT., 1938. *The unit Hydrograph and flood routing*, Unpublished paper, Conference of North Atlantic Division, US Army corps of Engineers, New London., CT. US Engineering Office, Providence RI.

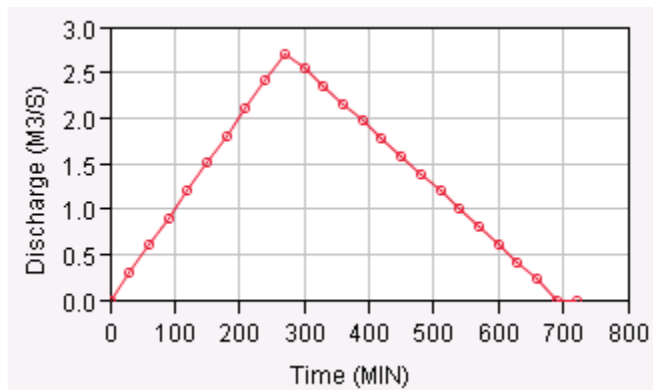
William, A., Fleming, M., 2010. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*.

Merwade V., 2010, *Tutorial on using HEC-GeoRAS with ArcGIS 9.3*, School of Civil Engineering, Purdue University

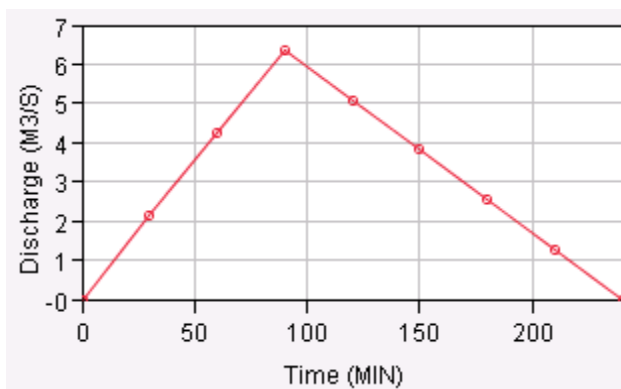
**Διαδικτυακοί τόποι**

<http://www.ktimatologio.gr>

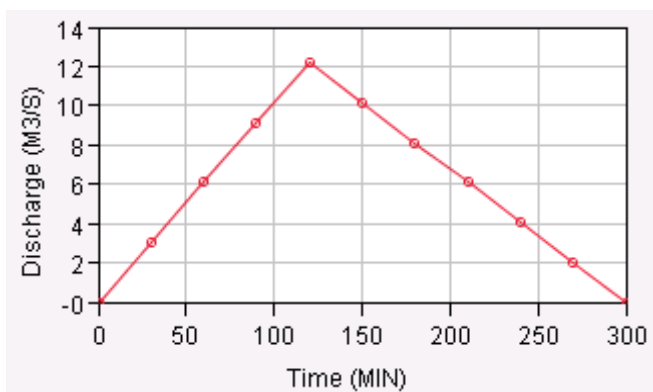
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



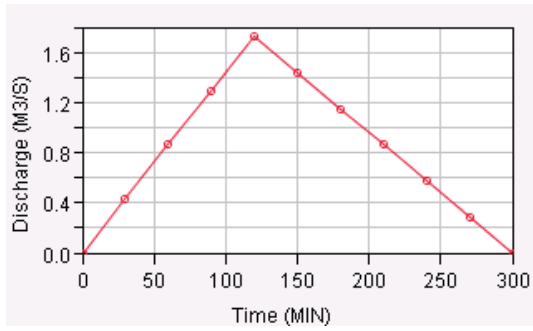
Σχήμα Π1: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W120 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



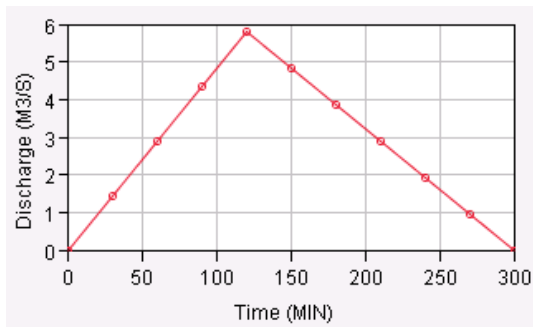
Σχήμα Π2: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W130 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



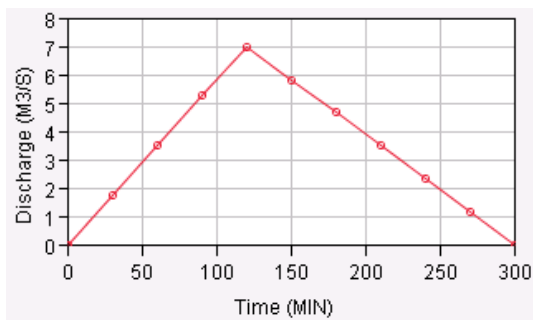
Σχήμα Π3: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W140 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



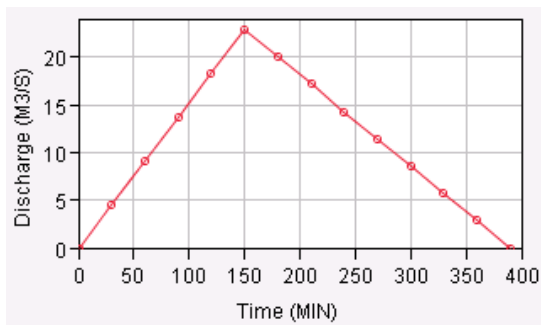
Σχήμα Π4: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W150 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



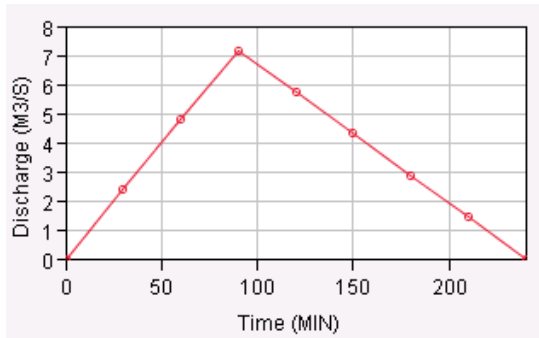
Σχήμα Π5: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W160 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



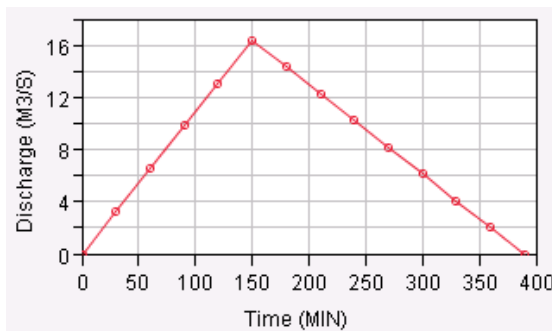
Σχήμα Π6: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W170 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



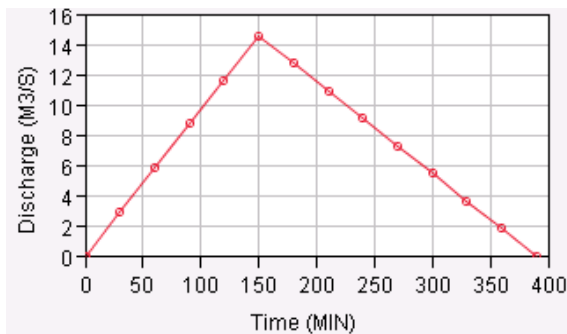
Σχήμα Π7: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W180 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



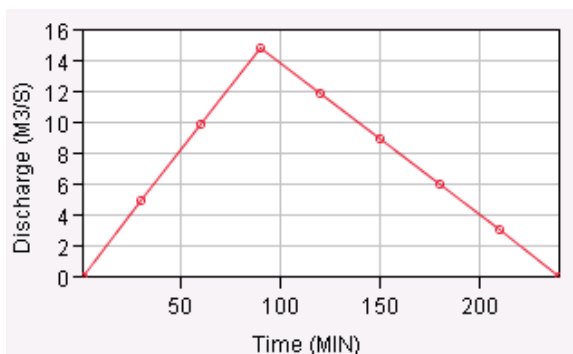
Σχήμα Π8: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W190 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



Σχήμα Π9: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W200 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.

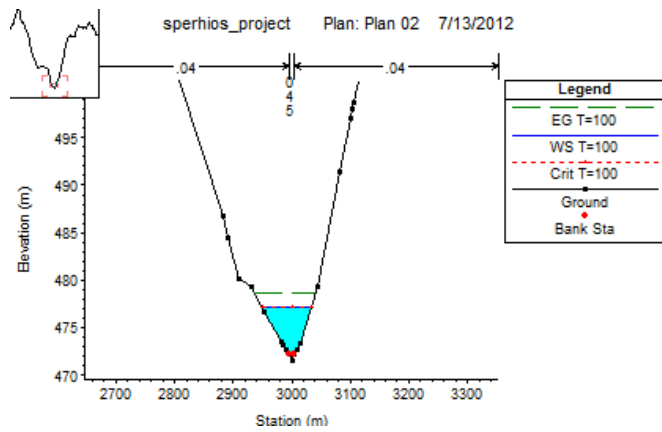


Σχήμα Π10: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W210 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.

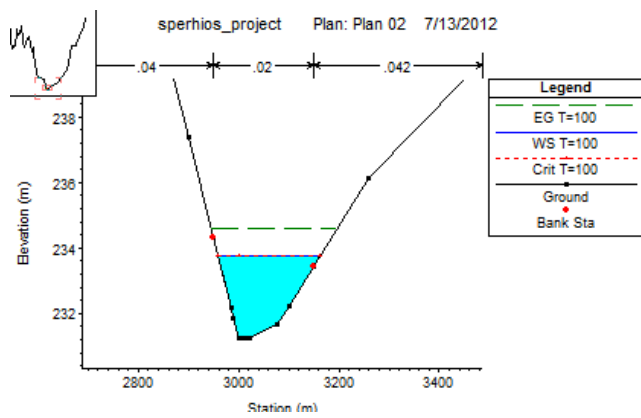


Σχήμα Π11: Μοναδιαίο υδρογράφημα υπολεκάνης W220 για περίοδο επαναφοράς 100 έτη.

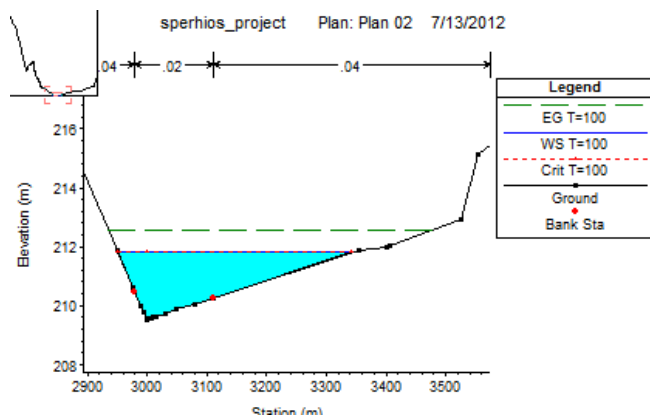




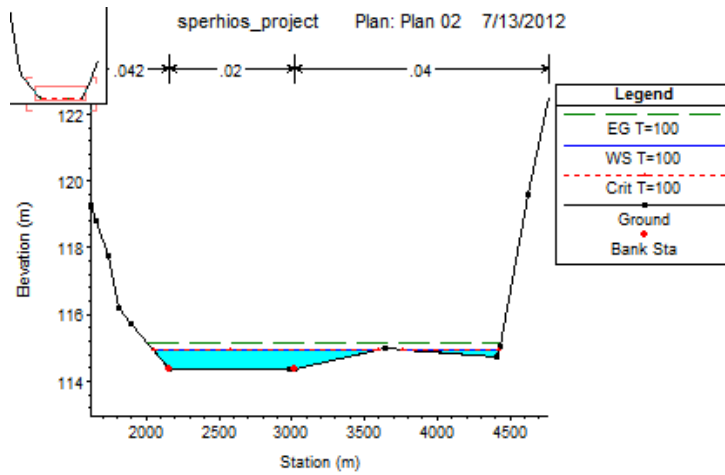
Σχήμα Π12: Βαθος ροης της Διτομης 10 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



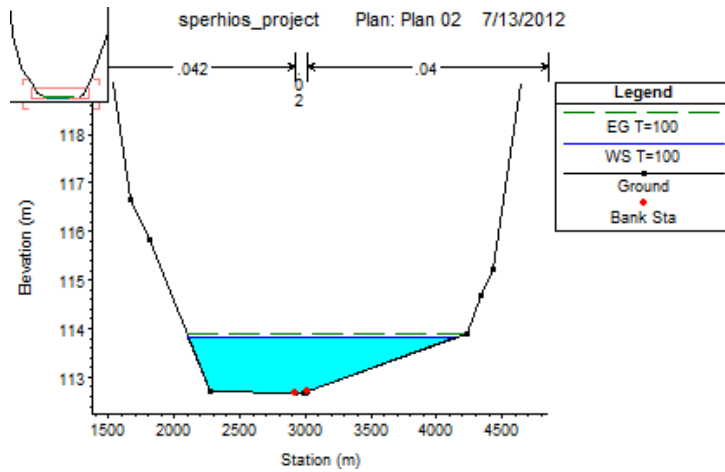
Σχήμα Π13: Βαθος ροης της Διτομης 9 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



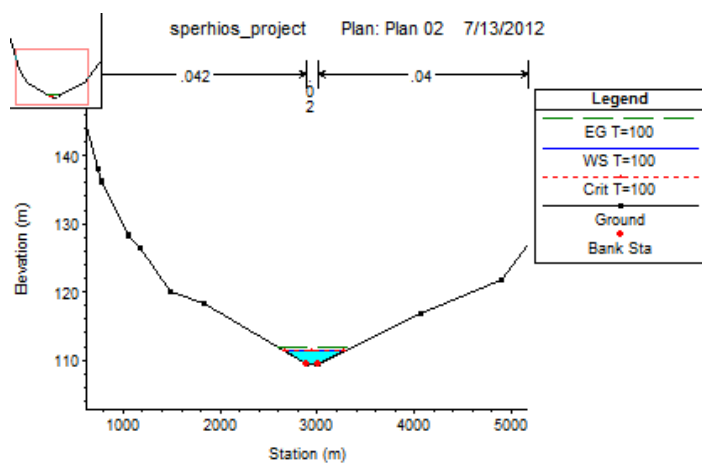
Σχήμα Π14: Βαθος ροης της Διτομης 8 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



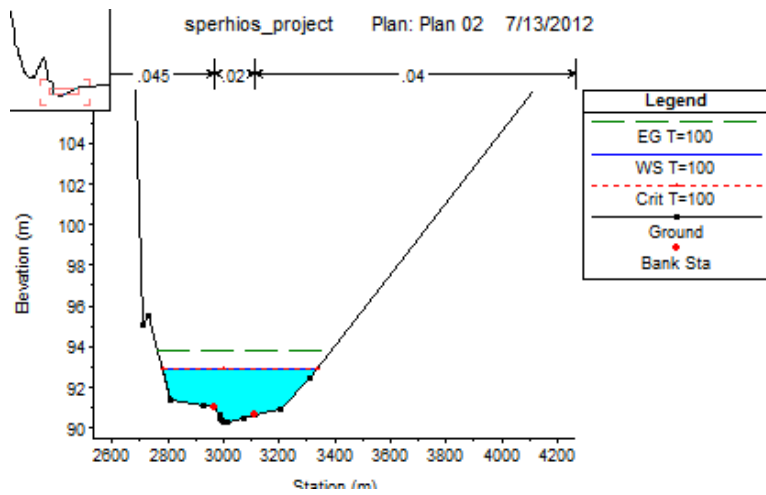
Σχήμα Π15: Βαθος ροής της Διτομής 7 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



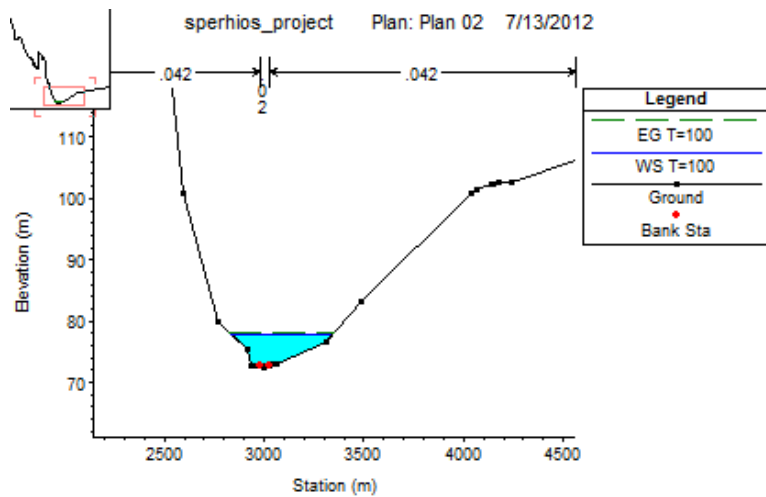
Σχήμα Π16: Βαθος ροής της Διτομής 6 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



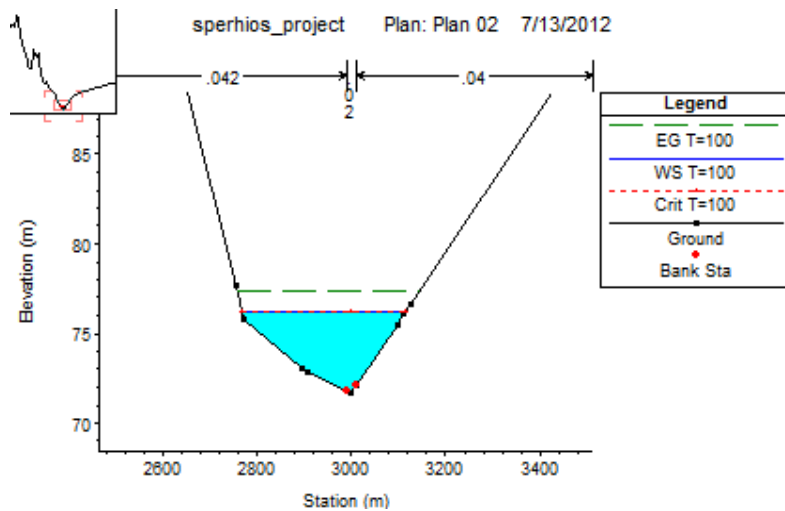
Σχήμα Π17: Βαθος ροής της Διτομής 5 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



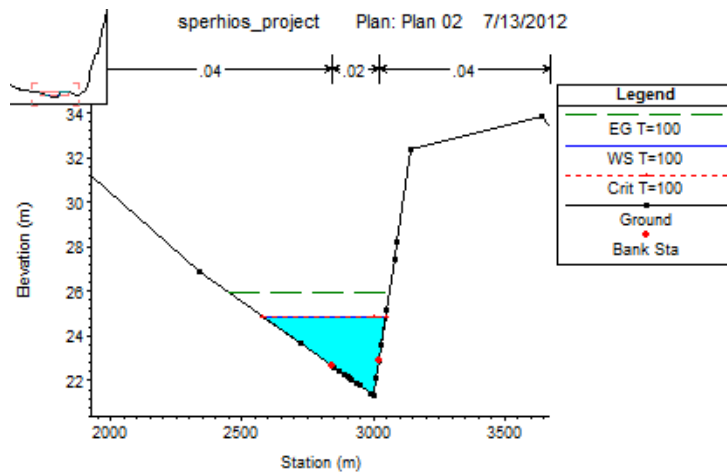
Σχήμα Π18: Βαθος ροής της Διτομής 4 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



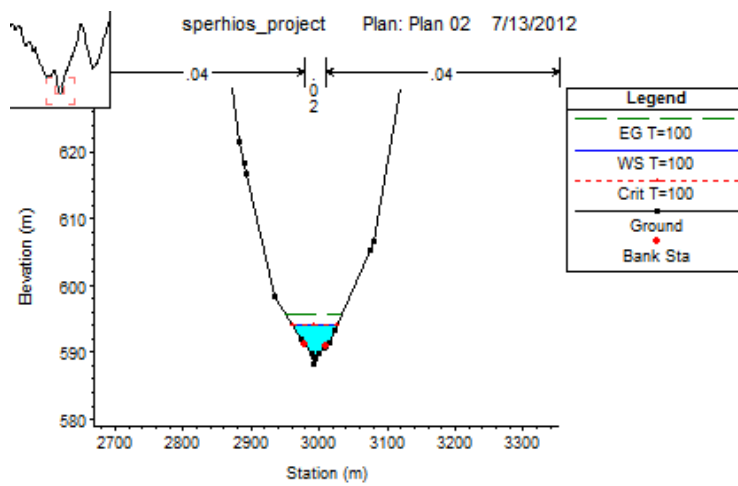
Σχήμα Π19: Βαθος ροής της Διτομής 3 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



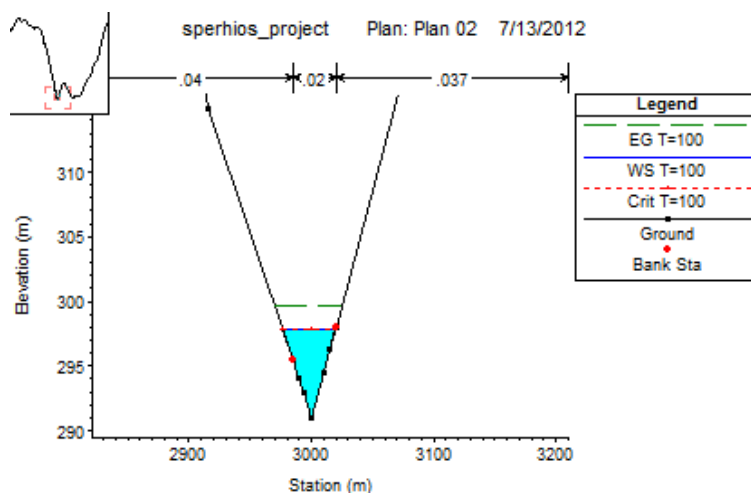
Σχήμα Π20: Βαθος ροής της Διτομής 2 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



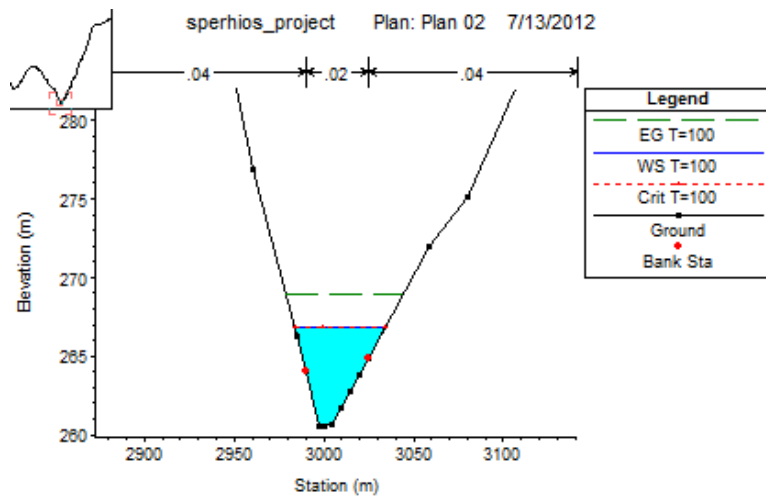
Σχήμα Π21: Βαθος ροής της Διτομής 1 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



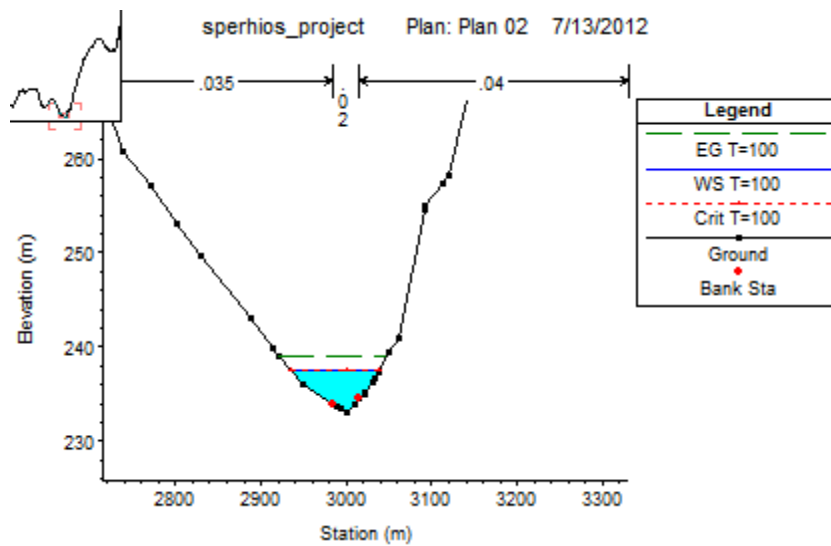
Σχήμα Π22: Βαθος ροής της Διτομής 104 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



Σχήμα Π23: Βαθος ροής της Διτομής 103 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



Σχήμα Π24: Βαθος ροής της Διτομής 102 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.



Σχήμα Π25: Βαθος ροής της Διτομής 101 για πλημμυρα με περίοδο επαναφοράς 100 έτη.