



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΑΡΚΑΔΙΑΣ

Ελευθέριος – Αλέξανδρος Θ. Γκικόκας

ΔΠΜΣ
«Επιστήμη &
Τεχνολογία
Υδατικών Πόρων»

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

Επιβλέπων: Νικόλαος Μαμάσης, Λέκτορας ΕΜΠ

**ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΕΚΠΟΝΗΣΗ ΧΑΡΤΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ Ν. ΑΡΚΑΔΙΑΣ**

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ελευθέριος – Αλέξανδρος Θ. Γκιοκάς

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π

e-mail: al.gkiokas@gmail.com

ΔΠΜΣ « Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»

Αθήνα,
Οκτώβριος 2009

Στους γονείς μου

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την παρουσία του επιβλέποντος κ. Νίκου Μαμάση, Λέκτορα ΕΜΠ, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση του θέματος και την καθοδήγησή του με καίριες επισημάνσεις.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Ελευθερία Σιαφολέα, ερευνήτρια στο εργαστήριο υδρολογίας & αξιοποίησης υδατικών πόρων και την κα. Αναστασία Κακαβά, φίλη και συνάδελφο Πολιτικό Μηχανικό, για τις πολύτιμες συμβουλές τους σχετικά με την εκτέλεση των μοντέλων HEC-HMS και HEC-RAS.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον κ. Σωτήρη Αρβανίτη, καθηγητή β' βαθμιας εκπαίδευσης Αρκαδικής καταγωγής, ο οποίος μου υπέδειξε τις ευπαθείς σε πλημμύρα περιοχές, δίνοντάς μου μια προσεγγιστική εκτίμηση και για το αναμενόμενο εύρος των πλημμυρικών κατακλύσεων.

Τέλος, ευχαριστώ τους καθηγητές και συμφοιτητές του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» για τη φετινή ευχάριστη και εποικοδομητική χρονιά αλλά και την οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξη στην υλοποίηση των προσωπικών μου στόχων.

*Α. Γκιόκας
Οκτώβριος 2009*

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	vi
Extended Abstract	viii
1 Εισαγωγή	2
1.1 Ο υδρολογικός κύκλος	2
1.2 Το υδρολογικό ισοζύγιο	3
1.3 Υδρολογικά μοντέλα	4
1.4 Πλημμύρες	5
1.5 Το καθεστώς πλημμυρών στην Ελλάδα	6
1.6 Η κοινοτική οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου	7
1.7 Αντικείμενο της εργασίας και περιγραφή της μεθοδολογίας	9
1.8 Δομή της εργασίας	12
2 Η Περιοχή Μελέτης	14
2.1 Ο ποταμός Αλφειός	14
2.2 Η υπό μελέτη λεκάνη απορροής του Αλφειού	15
3 Υδρολογική Προσομοίωση της Λεκάνης Απορροής	19
3.1 Γεωμορφολογική και Υδρολογική Ανάλυση Λεκάνης	20
3.1.1 Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους μέσω του πακέτου εντολών Terrain Pre-Processing	21
3.1.2 Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου HEC-HMS	24
3.1.3 Επιλογή προτύπων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων και δημιουργία αρχείων εισόδου HEC-HMS	26
3.2 Υδρολογική Απόκριση Λεκάνης	27
3.2.1 Μοντέλο Λεκάνης Απορροής (Basin Model Component)	29
3.2.1.1 Πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής	30
3.2.1.2 Πρότυπο υπολογισμού βασικής ροής	34
3.2.1.3 Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής	34
3.2.1.4 Πρότυπο διόδευσης πλημμύρας	38
3.2.2 Μετεωρολογικό Μοντέλο (Meteorologic Model Component)	38
3.2.3 Αρχείο Προσομοιώσεων (Control Specifications Component)	42
3.2.4 Αρχείο Αποτελεσμάτων	42
4 Υδραυλική Προσομοίωση Αλφειού Ποταμού	45
4.1 Δημιουργία Αρχείου Γεωμετρικών Δεδομένων	45
4.1.1 Παραγωγή ισοϋψών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους	46
4.1.2 Δημιουργία θεματικών επιπέδων (RAS Layers)	46
4.1.2.1 Κύρια γραμμή ροής ποταμού (Stream centerline)	46
4.1.2.2 Κύρια Όχθες (Bank Lines)	48
4.1.2.3 Διατομές (Cross-sectional cut lines)	48
4.1.2.4 Χρήσεις γης (Land uses)	50
4.1.3 Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή στο HEC-RAS	51

4.2	Υδραυλική Προσομοίωση Υδατορεύματος	51
4.2.1	Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων	52
4.2.2	Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων	53
4.2.3	Ρύθμιση παραμέτρων και εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών	55
4.2.3.1	Επιλογή διατομών μελέτης	56
4.2.3.2	Παράμετροι επίλυσης της εξίσωσης ενέργειας	56
4.2.4	Επισκόπηση αποτελεσμάτων	60
4.2.5	Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο HEC-GeoRAS	62
4.2.6	Σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών	63
4.2.7	Σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης	63
5	Αποτελέσματα Αναλύσεων & Σύνθεση Χαρτών	66
5.1	Υδρολογική Προσομοίωση Λεκάνης	66
5.2	Πλημμυρική Κατάκλυση Λεκάνης	70
6	Συμπεράσματα	84
6.1	Γενικά	84
6.2	Συμπεράσματα προσομοιώσεων	84
6.2.1	Υδρολογική προσομοίωση	84
6.2.2	Υδραυλική προσομοίωση	85
6.3	Συμπεράσματα χαρτογράφησης πλημμυρικών κατακλύσεων	86
6.4	Συνολική αποτίμηση και προτάσεις μετεξέλιξης της εργασίας	87
	Βιβλιογραφία	89
	Παράρτημα	91

Διαγράμματα

<i>Διάγραμμα 1.1:</i>	<i>Σχηματική απεικόνιση των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου</i>	<i>2</i>
<i>Διάγραμμα 1.2:</i>	<i>Δόμηση Υδρολογικού Μοντέλου</i>	<i>5</i>
<i>Διάγραμμα 1.3:</i>	<i>Τυποποίηση μεθοδολογίας για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας</i>	<i>11</i>
<i>Διάγραμμα 3.1:</i>	<i>Διαδικασία εκτέλεσης υδρολογικής προσομοίωσης μέσω HEC-HMS</i>	<i>19</i>
<i>Διάγραμμα 3.2:</i>	<i>Απεικόνιση διεργασιών βροχής - απορροής</i>	<i>28</i>
<i>Διάγραμμα 3.3:</i>	<i>Μοντελοποίηση απορροής από το HEC-HMS (Feldman 2000)</i>	<i>28</i>
<i>Διάγραμμα 3.4:</i>	<i>Όμβριες καμπύλες για διάφορες περιόδους επαναφοράς</i>	<i>39</i>
<i>Διάγραμμα 3.5:</i>	<i>Υετογράφημα σχεδιασμού βροχής 24 h για περίοδο επαναφοράς 50 ετών – αθροιστικά ύψη ανά δεκαπεντάλεπτο</i>	<i>40</i>
<i>Διάγραμμα 3.6:</i>	<i>Υετογράφημα σχεδιασμού βροχής 24 h για περίοδο επαναφοράς 50 ετών – τμηματικά ύψη ανά δεκαπεντάλεπτο</i>	<i>41</i>
<i>Διάγραμμα 3.7:</i>	<i>Υδρογράφημα λεκάνης για</i>	<i>43</i>
<i>Διάγραμμα 4.1:</i>	<i>Διαδικασίας εκτέλεσης υδραυλικής προσομοίωσης μέσω HEC-RAS</i>	<i>45</i>
<i>Διάγραμμα 4.2:</i>	<i>Απεικόνιση μεγεθών της εξίσωσης ενέργειας</i>	<i>57</i>
<i>Διάγραμμα 4.3:</i>	<i>Διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 2 ετών</i>	<i>61</i>
<i>Διάγραμμα 4.4:</i>	<i>Διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 100 ετών</i>	<i>61</i>
<i>Διάγραμμα 4.5:</i>	<i>Μεταβολή στάθμης στη διατομή με την αύξηση της πλημμυρικής παροχής</i>	<i>61</i>
<i>Διάγραμμα 5.1:</i>	<i>Μέγιστα 15-λεπτα τμηματικά ύψη βροχής διάρκειας 24 h</i>	<i>66</i>
<i>Διάγραμμα 5.2:</i>	<i>Μέγιστα αθροιστικά ύψη βροχής διάρκειας 24 h</i>	<i>66</i>
<i>Διάγραμμα 5.3:</i>	<i>Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού</i>	<i>67</i>
<i>Διάγραμμα 5.4:</i>	<i>Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού</i>	<i>67</i>

Διάγραμμα 5.5: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.....	68
Διάγραμμα 5.6: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.....	68
Διάγραμμα 5.7: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.....	69
Διάγραμμα 5.8: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού.....	69
Διάγραμμα 5.9: Παροχές αιχμής Αλφειού ποταμού για έξι περιόδους επαναφοράς ...	70
Διάγραμμα 5.10: Εμβαδά κατακλυζομένων εκτάσεων για έξι περιόδους επαναφοράς70	

Πίνακες

Πίνακας 1.1: Παγκόσμια κατανομή υδατικών πόρων (Gleick 1996).....	3
Πίνακας 3.1: Εντολές του μενού Terrain Pre-Processing	21
Πίνακας 3.2: Υπολογισμός τοπογραφικών μεγεθών λεκάνης.....	26
Πίνακας 3.3: Δημιουργία υποβάθρου HMS από το μενού HMS.....	27
Πίνακας 3.4: Τύποι προηγηθεισών συνθηκών υγρασίας κατά SCS.....	31
Πίνακας 3.5: Τύποι εδαφών κατά SCS ανάλογα με τη διαπερατότητά τους.....	32
Πίνακας 3.6: Τυπικοί αριθμοί καμπύλης απορροής (CN) κατά SCS για προηγηθείσες συνθήκες υγρασίας τύπου II (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999).....	32
Πίνακας 3.7: Συντεταγμένες σημείων υδρογραφήματος Snyder.....	37
Πίνακας 3.8: Υπολογισμός χρόνου υστέρησης για τη Λεκάνη.....	38
Πίνακας 3.9: Συντελεστής C_p	38
Πίνακας 3.10: Βήματα υπολογισμού υετογραφήματος σχεδιασμού βροχής 24 h για περίοδο επαναφοράς 50 ετών.....	40
Πίνακας 3.11: Εισαγωγή δεδομένων στο HEC-HMS.....	41
Πίνακας Π - 1: Εκδόσεις υπολογιστικών λογισμικών.....	92
Πίνακας Π - 2: Συσχέτιση κωδικών με χρήσεις γης	93
Πίνακας Π - 3: Κατάταξη τύπων εδάφους σε υδρολογικές ομάδες	95
Πίνακας Π - 4: Απόδοση τιμών CN σε συνδυασμούς χρήσης γης με.....	95

Χάρτες

Χάρτης 2.1: Τοπογραφικό ανάγλυφο Λεκάνης Αλφειού ποταμού.....	16
Χάρτης 2.2: Κλίσεις εδάφους Λεκάνης Αλφειού Ποταμού	16
Χάρτης 2.3: Εδαφικοί τύποι Λεκάνης Αλφειού Ποταμού.....	17
Χάρτης 2.4: Χρήσεις γης Λεκάνης Αλφειού Ποταμού.....	17
Χάρτης 5.1: Πιεζομετρικός χάρτης για περίοδο επαναφοράς 2 ετών.....	71
Χάρτης 5.2: Πιεζομετρικός χάρτης για περίοδο επαναφοράς 10 ετών.....	72
Χάρτης 5.3: Πιεζομετρικός χάρτης για περίοδο επαναφοράς 20 ετών.....	73
Χάρτης 5.4: Πιεζομετρικός χάρτης για περίοδο επαναφοράς 50 ετών.....	74
Χάρτης 5.5: Πιεζομετρικός χάρτης για περίοδο επαναφοράς 100 ετών.....	75
Χάρτης 5.6: Πιεζομετρικός χάρτης για περίοδο επαναφοράς 1000 ετών.....	76
Χάρτης 5.7: Πλημμυρική κατάκλυση λεκάνης για περίοδο επαναφοράς 2 ετών.....	77
Χάρτης 5.8: Πλημμυρική κατάκλυση λεκάνης για περίοδο επαναφοράς 10 ετών.....	78
Χάρτης 5.9: Πλημμυρική κατάκλυση λεκάνης για περίοδο επαναφοράς 20 ετών.....	79
Χάρτης 5.10: Πλημμυρική κατάκλυση λεκάνης για περίοδο επαναφοράς 50 ετών.....	80
Χάρτης 5.11: Πλημμυρική κατάκλυση λεκάνης για περίοδο επαναφοράς 100 ετών ..	81
Χάρτης 5.12: Πλημμυρική κατάκλυση λεκάνης για περίοδο επαναφοράς 1000 ετών.82	

Σχήματα

Σχήμα 1.1: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960 –1990 ανά υδατικό διαμέρισμα, Πηγή: (http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr ΕΤΥΜΠ).....	6
Σχήμα 2.1: Πλήρης έκταση του ποταμού Αλφειού.....	14

Σχήμα 2.2: Γεωγραφική τοποθέτηση της περιοχής μελέτης.....	15
Σχήμα 3.1: Τιμή κεντρικού εικονοστοιχείου ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής.....	22
Σχήμα 3.2: Κάναβος διευθύνσεων απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη 2009).....	23
Σχήμα 3.3: Κάναβος Αθροίσματος Φατιών Απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη 2009).....	23
Σχήμα 3.4: Μήτρα δεδομένων στο HEC-GeoHMS για τον υπολογισμό περιοχής μελέτης.....	25
Σχήμα 3.5: Δημιουργία περιοχής μελέτης σε περιβάλλον HEC-GeoHMS.....	25
Σχήμα 3.6: Μοντέλο λεκάνης απορροής.....	29
Σχήμα 3.7: Κάνναβος υπολογισμού αριθμού CN.....	33
Σχήμα 3.8: Παράθυρο εκτέλεσης υπολογισμού απωλειών.....	34
Σχήμα 3.9: Το μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder.....	37
Σχήμα 3.10: Δημιουργία αρχείου προσομοίωσης.....	42
Σχήμα 4.1: Ισοϋψείς καμπύλες περιοχής μελέτης και ψηφιοποιημένη.....	47
Σχήμα 4.2: Ονομασία τμήματος ποταμού.....	47
Σχήμα 4.3: Κατασκευή διατομών πλάτους 200 m σε ισοδιάσταση 100 m.....	49
Σχήμα 4.4: Κατασκευή θεματικού επιπέδου διατομών.....	49
Σχήμα 4.5: Η περίπτωση σύμπτωσης δύο διατομών.....	49
Σχήμα 4.6: Ενδεικτική διατομή της κοίτης του ποταμού Αλφειού.....	50
Σχήμα 4.7: Εξαγωγή πολυγώνων χρήσεων γης που.....	50
Σχήμα 4.8: Απόδοση τιμών συντελεστή Manning σε πολύγωνα χρήσεων γης.....	51
Σχήμα 4.9: Επεξεργασία των γεωμετρικών στοιχείων κάθε διατομής.....	52
Σχήμα 4.10: Παράθυρο εισαγωγής υδρολογικών δεδομένων μόνιμης ροής.....	53
Σχήμα 4.11: Εύρεση κλίσης πυθμένα στο πλέον ανάντη σημείο.....	55
Σχήμα 4.12: Ορισμός ομοιόμορφου βάθους στην πλέον ανάντη διατομή.....	55
Σχήμα 4.13: Ρύθμιση παραμέτρων υδραυλικού μοντέλου.....	56
Σχήμα 4.14: Διαχωρισμός διατομής σε τμήματα μελέτης.....	56
Σχήμα 4.15: Παροχές διατομών στο αριστερό, κεντρικό και δεξί τμήμα της διατομής.....	58
Σχήμα 4.16: Υπολογισμός συντελεστή K για όλη τη διατομή.....	59
Σχήμα 4.17: Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας διατομής.....	59
Σχήμα 4.18: Τρισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης.....	62
Σχήμα 4.19: Τρισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης.....	62
Σχήμα 4.20: Χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης και 4 επιλεγμένες διατομές.....	64
Σχήμα Π - 1: Χάρτης χρήσεων γης.....	92
Σχήμα Π - 2: Υδρολιθικοί τύποι εδάφους.....	93
Σχήμα Π - 3: Χάρτης τομής χρήσεων γης με υδρολιθικούς τύπους εδαφών.....	95

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης, μέσω της αξιοποίησης των υπολογιστικών δυνατοτήτων λογισμικών επεξεργασίας και οπτικοποίησης της υδρολογικής, υδραυλικής και γεωγραφικής πληροφορίας.

Πιο συγκεκριμένα, η κατάρτιση της προτεινόμενης μεθοδολογίας βασίστηκε στη χρήση του λογισμικού HEC-HMS για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης και στη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης της ροής σε ανοικτούς αγωγούς, HEC-RAS. Τα δύο αυτά λογισμικά «συνεργάζονται» με το ευρέως διαδεδομένο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS για την ενδιάμεση επεξεργασία των δεδομένων και την οπτικοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων υπό μορφή χαρτών.

Συνοπτικά, η μεθοδολογία δομήθηκε ως εξής:

- Συλλογή και επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων (Ψηφιακό μοντέλο εδάφους, χάρτες χρήσεων γης και τύπων εδάφους, υδρολογική πληροφορία κλπ)
- Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης για την εκτίμηση των καταιγίδων και πλημμυρών σχεδιασμού για έξι περιόδους επαναφοράς
- Υδραυλική προσομοίωση της ροής κατά μήκος του ποταμού για την εκτίμηση της γραμμής ενέργειας και των πιεζομετρικών βαθών
- Ψηφιακή χαρτογράφηση των πλημμυρικών κατακλύσεων

Ως περιοχή μελέτης (Case study) επελέγη τμήμα 165 km² της άνω λεκάνης του Αλφειού ποταμού στην ευρύτερη περιοχή του Δήμου Φαλαισίας του Νομού Αρκαδίας. Για την περιοχή αυτή αποκτήθηκαν ως πρωτογενή δεδομένα το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, οι χρήσεις γης και οι τύποι εδάφους, ενώ ελλείπει αξιόπιστων βροχομετρικών δεδομένων, έγινε προσεγγιστική εκτίμηση του υδρολογικού καθεστώτος με προσαρμογή σε δεδομένες όμβριες καμπύλες άλλων Ελληνικών περιοχών. Εξάλλου, ο εξαρχής τεθείς στόχος της εργασίας δεν ήταν τόσο η ακριβής υδρολογική μελέτη της περιοχής, όσο η διερεύνηση των πλημμυρικών κατακλύσεων για διάφορα πλημμυρικά επεισόδια και η τυποποίηση της μεθοδολογίας παραγωγής πλημμυρικών χαρτών από το «α» έως το «ω».

Η εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης έδωσε τα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού για 6 περιόδους επαναφοράς (2,10,20,50,100,1000 έτη), με βάση τα οποία, ακολούθησε η υδραυλική προσομοίωση τμήματος 20 km του ποταμού Αλφειού σε συνθήκες μόνιμης ροής.

Εξαγόμενο αποτέλεσμα των προσομοιώσεων ήταν ο υπολογισμός της πιεζομετρικής επιφάνειας για κάθε περίοδο επαναφοράς και η εν συνεχεία αντιπαραβολή της με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους για τον προσδιορισμό των βαθών του νερού.

Τέλος, με δεδομένα τα παραπάνω στοιχεία, χαρτογραφήθηκαν τα πολύγωνα των πλημμυρικών κατακλύσεων και έγινε σύγκριση της διακύμανσης των πλημμυρισμένων εκτάσεων σε σχέση με την αύξηση της πλημμυρικής παροχής αιχμής.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε σχετικά μικρό πεδίο πλημμυρικών κατακλύσεων (1-2 km²) για κάθε επεισόδιο υετόπτωσης και ανάλογα μικρή αύξηση του εμβαδού των κατακλυζόμενων εκτάσεων με την αύξηση της περιόδου επαναφοράς. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται απόλυτα λόγω των σημαντικών υψομετρικών διαφορών ένθεν και ένθεν του ποταμού.

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία πραγματεύεται σημαντικό μέρος του περιεχομένου της οδηγίας 2007/60/ΕΚ για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου. Η οριοθέτηση των πλημμυρικών κατακλύσεων, σε συνδυασμό με την προτεινόμενη μετεξέλιξη της εργασίας στην κατεύθυνση της εκτίμησης κόστους ζημιών ανά χρήση γης, αποκτά σπουδαία επιχειρησιακή αξία, καθώς συμβάλλει καίρια στην πρόβλεψη, πρόληψη και αντιμετώπιση των δυσμενών επιπτώσεων των πλημμυρικών φαινομένων.

Extended Abstract

Introduction - scope

The continuous movement of water on, above and below the surface of the Earth is governed by the mass-balance principle, which is achieved through the successive water state changes (liquid, vapor, ice). This periodic set of changes forms the so called «hydrologic cycle» and can be described by the following equation:

$$\text{Runoff} = \text{Precipitation} - \text{Infiltration} - \text{Interception} - \text{Evaporation}$$

Flood can simply be defined as the physical phenomenon, during which an initially dry land area is covered by water. Floods are normally caused by climatic processes, while their evolution depends mainly on geomorphologic factors, such as soil stability and permeability, vegetation cover, as well as the geometrical characteristics of the river basin.

The scope of the postgraduate thesis, entitled as: «Elaboration of a standardized methodological framework for mapping flood inundation in Alfeios river basin» is the development of an integrated «from a to z» methodology, which combines the fields of hydrology, hydraulics, geomatics and cartography for the creation of several return-period flood maps. The study was accomplished through the use of the software, developed by the Hydrologic Engineering Center of the U.S. Army corps of Engineers. Specifically, the methodology takes advantage of the software HEC-HMS, which simulates the hydrologic processes of river basins and determines the design flood hydrographs in several return periods and the software HEC-RAS, which simulates open channel flow (river systems) and computes the energy gradients and piezometric levels along the river. Both packages are compatible with the well-known geographical information system ArcGIS, which can be used for further data processing and visualization for cartographical purposes.

Thesis outline

The thesis is structured in chapters as follows:

- Chapter 1 - Introduction
 - Presentation of basic concepts concerning the hydrologic cycle and the floods
 - Current condition in Greece

- Short analysis of the active EU directive 2007/60/EC for the assessment and management of flood risks
- Thesis scope and brief description of the methodology followed
- Chapter 2 - Presentation of the case study
 - Geographical and historical information
 - Raw data assembly (i.e. digital elevation model, land use maps, soil type maps, hydrologic data etc)
- Chapter 3 – Hydrologic simulation of river basin
 - Data processing, through the use of HEC-GeoHMS, for the determination of basin topology and the computation of topographical and hydrological characteristics
 - Hydrologic simulation, through the use of HEC-HMS, for the computation of design floods for several return periods
 - Scientific background of the methodology followed
- Chapter 4 - Hydraulic simulation of Alfeios river
 - River mapping, through the use of HEC-GeoRAS for the determination of the river geometry
 - Hydraulic open channel flow simulation in steady flow conditions, through the use of HEC-RAS, for the computation of piezometric surface and energy gradients
 - Exportation of simulation results to HEC-GeoRAS for the digital mapping of water surface and floodplain delineation for each return period
 - Scientific background of the methodology followed
- Chapter 5 – Simulation results and production of flood maps
 - Hydrologic simulation results
 - Hydraulic simulation results
 - Water surface maps for six return periods
 - Floodplain delineation maps for six return periods
- Chapter 6 - Conclusions of the study
 - Comparative analysis between the results of the different return periods
 - Evaluation of the study and recommendations for further research

Case study

The case study of the developed methodology is part of the upper basin of Alfeios river in Arcadia, Greece, covering an area of 165 km². For this region, the collected raw data consisted of the digital elevation model, as well as the land use and soil type maps. As for the hydrologic inputs, the shortage of reliable rainfall data resulted in the estimation of rainfall intensity curves, as adapted to data from adjacent basins. It has to be noticed that the main target of the dissertation is not so much the elaboration of a precise hydrologic study, but the determination of the basin response to several flood episodes, through the standardization of a «step by step» methodology of creating flood maps.

Hydrologic simulation

The hydrologic simulation was designed and run through the use of HEC-HMS, with the collaboration of HEC-GeoHMS, which is a hydrologic add-in tool in the ArcGIS platform.

The representation of the watershed hydrologic processes was based in the formulation of models for the computation of rainfall losses and direct runoff. Channel flow routing and baseflow components were omitted on purpose, as of their minor role in the accomplishment of the thesis' target for the estimation of river response to the inflow of peak discharges corresponding to several return periods.

The selection of methods was mainly determined by the shortage of reliable data of the region. Consequently, the SCS¹ method was applied for the computation of rainfall losses and the Snyder unit hydrograph was applied for the calculation of the direct runoff².

The simulation was run for 6 design storms (like the one shown in fig.1), which derived from the estimated rainfall intensity curves, corresponding to the return periods T=2 yrs, T=10 yrs, T=20 yrs, T=50 yrs, T=100 yrs, T=1000 yrs.

The output of the procedure is a package of six design flood hydrographs (like the one shown in fig.1), from which the peak discharges are extracted (as presented in the chart 1).

¹ The input data required for this method are the land uses map and the soil types map of the wider area.

² The input data required for this method are the geomorphologic features, which are easily determined through the computational process.

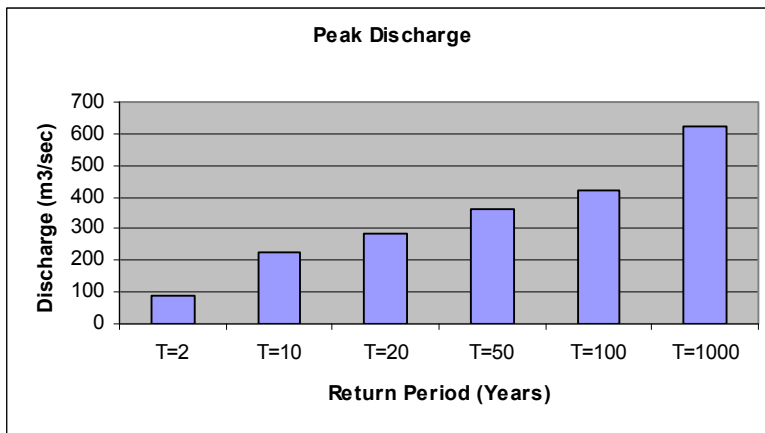


Chart 1: Peak discharges of Alfeios river for six return periods

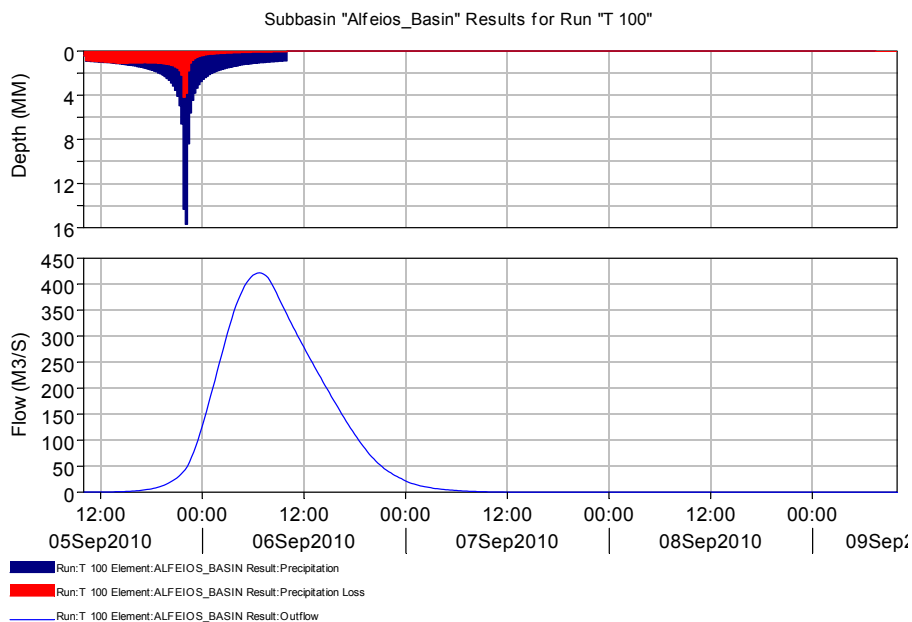


Figure 1: Design storm graph and flood hydrograph for a 24-hour rainfall event corresponding to 100-years return period

Hydraulic simulation

The hydraulic simulation of 20 km along Alfeios river was designed and run for six return periods through the use of HEC-RAS, with the collaboration of HEC-GeoRAS, an add-in to ArcGIS.

The first part of the procedure consists of the creation of a geo-database. Which includes the geometric characteristics of the river (i.e. stream centerline, bank lengths, cross-sections etc).

After the accomplishment of the first step, the river was simulated in steady flow conditions and the relevant boundary conditions, as set up according to the specific requirements of each one of the six design floods. The whole computational

procedure is based on the resolution of the energy balance equation between consecutive river cross-sections. Particularly, the calculations result in the determination of the piezometric depth, the mean kinetic energy and the energy gradient for every cross-section. In the following charts, indicative responses of a river cross-section for a 2-year and a 100-year flood event are presented.

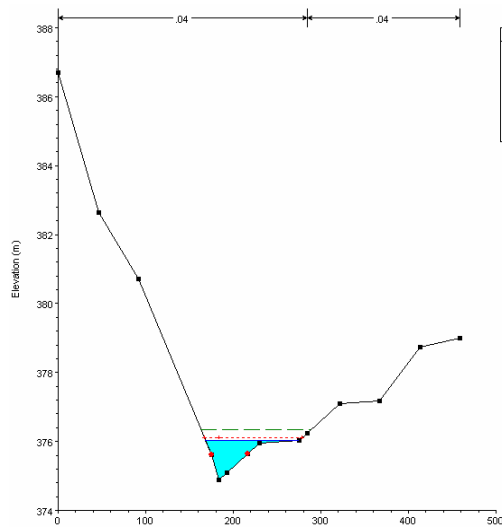


Chart 2: River cross section for a 2-year flood event

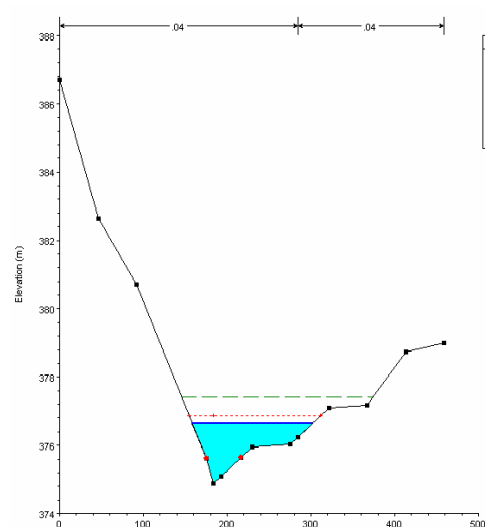


Chart 3: River cross section for a 100-year flood event

Digital mapping

The results of hydrologic and hydraulic simulation provide all the necessary data for the creation of floodplain maps, which is implemented through the use of HEC-GeoRAS.

The software compares the grid cell values of the digital elevation model (i.e. topographical elevations) with the corresponding values of piezometric surface (i.e. water surface elevations). If the latter is greater than the initial elevation, then the corresponding cell gets the value, as resulting from the subtraction «water surface elevation – topographical elevation». The output product is a new grid surface, which depicts the water depths in the whole area of the river basin. In the following figure, the 100-year floodplain of the river basin is presented along with four «zoomed-in» indicative cross-sections.

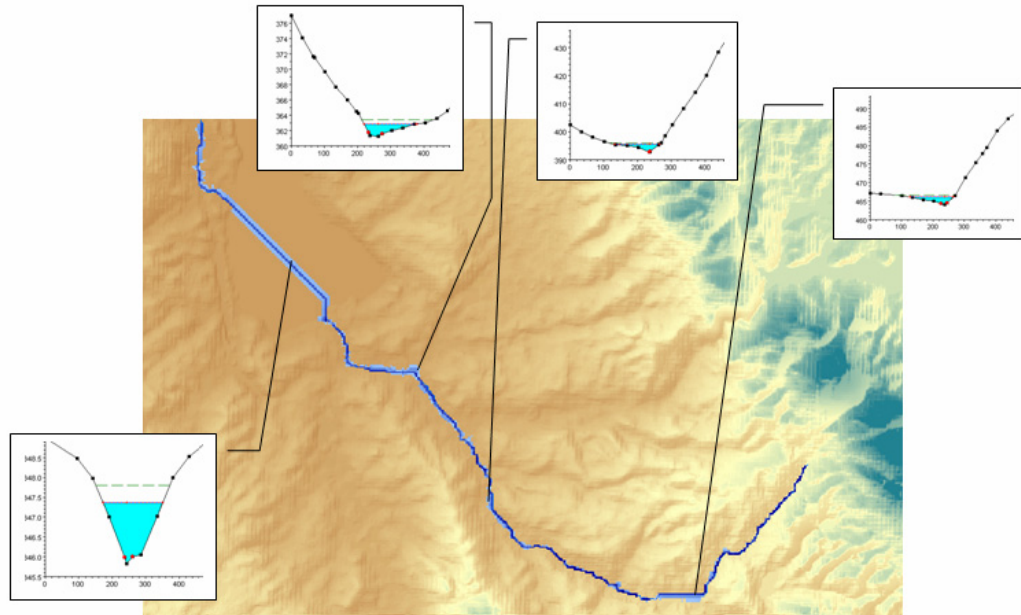


Figure 2: Floodplain delineation map for a 100-year flood event

Conclusions

The comparison between the inundated areas between the six different flood events leads to the conclusion that there is a little correlation between the increase in peak discharge flows with the corresponding increase in the floodplain area (chart 4). For instance, a 47.9% peak discharge increase (between a 100-year and a 1000-year flood event) results in a corresponding 14.78% increase in the floodplain area. This can be justified by the fact that the slopes of the basin areas along the river are steep enough to avert a «blow-up» in the inundated areas.

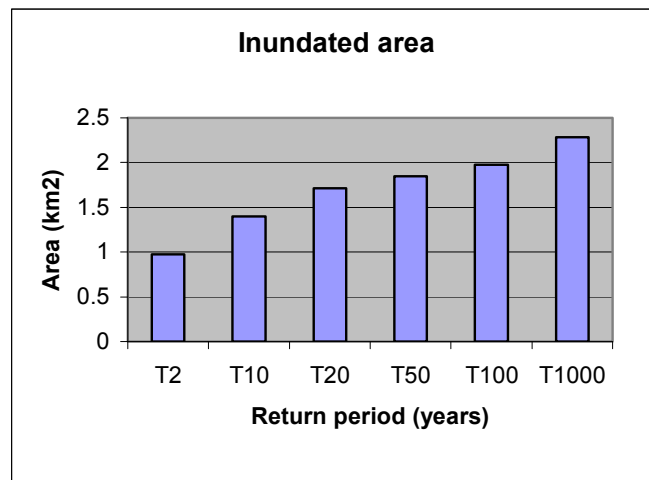


Chart 4: Inundated areas for six flood events

Evaluation of the study

Floods are – undoubtedly - among the most crucial problems in the field of natural disasters management. The floodplain delineation of a basin for several flood events is of vital importance, specifically in regions where human activities, like agriculture, farming and industry flourish.

As a consequence, a logical recommendation for the thesis' continuation could be the incorporation of the cost factor for the estimation of the financial damage per land use, as occurred after a flood event. This procedure results in the production of flood hazard maps, which – along with the floodplain delineation maps – provide a strong operational tool for the elaboration of integrated flood management plans in the direction of prevention and/or minimization of the adverse flood effects.

In conclusion, the current thesis, which is based on the specs of the directive 2007/60/EC, provides the «step-by-step» building of a standardized methodology (chart 5) for the digital mapping of floodplains (like the one shown in map 1). The scientific background of the methods uses were extensively analyzed, so that the importance of the engineer's subjectivity and experience is sufficiently highlighted.

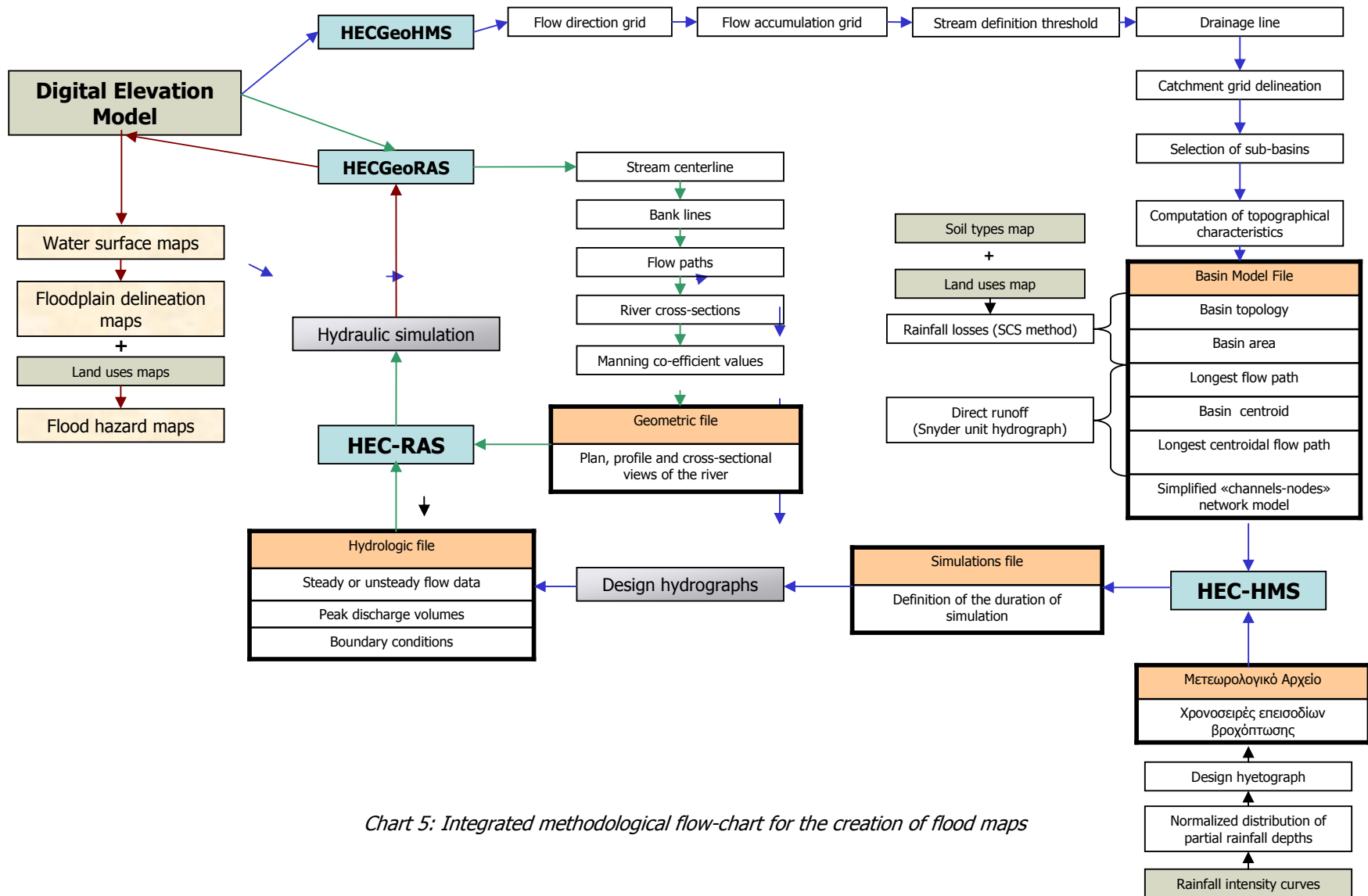
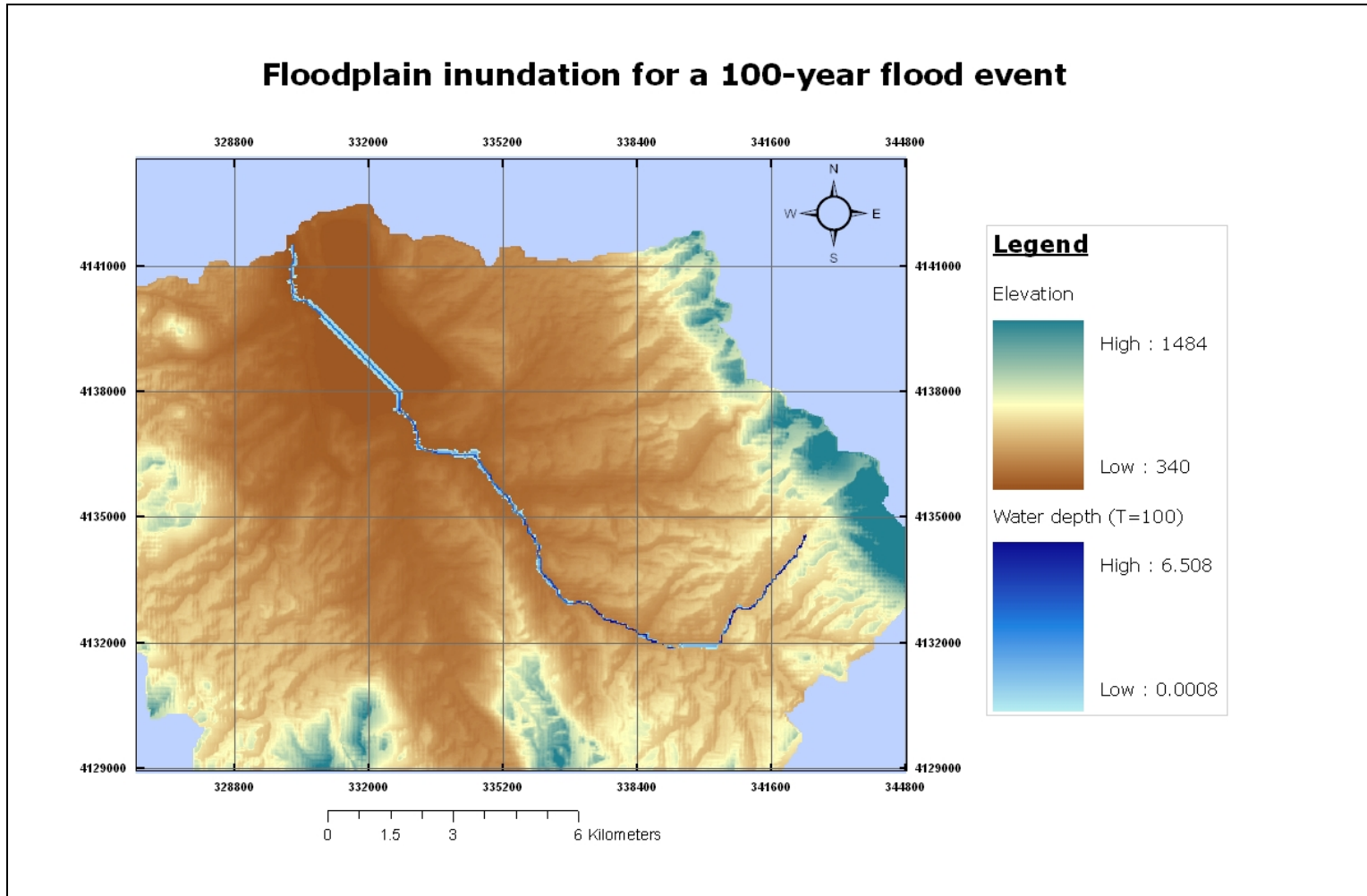
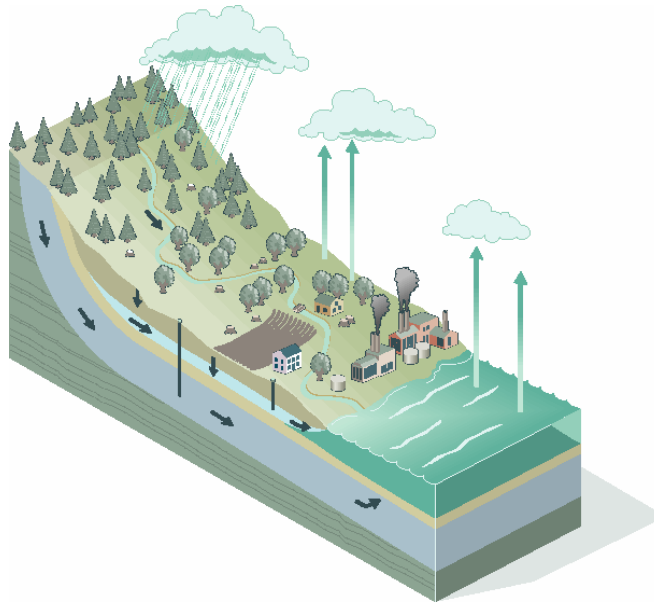


Chart 5: Integrated methodological flow-chart for the creation of flood maps

Floodplain inundation for a 100-year flood event



Map 1: Floodplain inundation map for a 100-year return period event



Περίληψη

Η εκπόνηση χαρτών πλημμύρας αποτελεί μια εξαιρετικά σύνθετη διαδικασία, η οποία συνδυάζει τις επιστήμες της υδρολογίας, υδραυλικής, γεωγραφίας και χαρτογραφίας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μερικές βασικές έννοιες της επιστήμης της υδρολογίας πλημμυρών, τα σημαντικότερα στοιχεία της ισχύουσας κοινοτικής οδηγίας διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου, καθώς και στοιχεία για το πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα. Τέλος, δίδεται η δόμηση της εργασίας σε κεφάλαια, καθώς και το καταρτισθέν ολοκληρωμένο διάγραμμα τυποποίησης της μεθοδολογίας εκπόνησης χαρτών πλημμυρικών κατακλύσεων.

Θεματικοί Άξονες Κεφαλαίου

- Εισαγωγή στην επιστήμη της υδρολογίας πλημμυρών
- Πλημμυρικό καθεστώς στην Ελλάδα και οδηγία 2007/60
- Διάγραμμα τυποποίησης μεθοδολογίας για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας

1 Εισαγωγή

1.1 Ο υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος περιγράφει την αέναη κίνηση του νερού στα εδαφικά στρώματα και στην ατμόσφαιρα μέσω μιας σειράς διεργασιών. Ο ήλιος, ο οποίος κινεί τον υδρολογικό κύκλο, θερμαίνει το επιφανειακό νερό, το οποίο εν μέρει εξατμίζεται και ανέρχεται στην ατμόσφαιρα υπό μορφή υδρατμών μαζί με το νερό της εξατμισοδιαπνοής. Καθώς οι υδρατμοί ανεβαίνουν στην ατμόσφαιρα, οι εκεί χαμηλότερες θερμοκρασίες τους αναγκάζουν να συμπυκνωθούν και να σχηματίσουν τα σύννεφα. Αυτά μεταφέρονται από ρεύματα αέρος σε μεγάλες αποστάσεις, προκαλώντας την ένωση των υδάτινων σωματιδίων, τα οποία μεγαλώνουν σε μέγεθος και κατακρημνίζονται υπό την επίδραση της βαρύτητας. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των κατακρημνίσεων οδηγείται πίσω στους ωκεανούς και τις λίμνες χάρη στην επιφανειακή απορροή. Σε μικρότερα ποσοστά, νερό συγκρατείται στα φυλλώματα των δέντρων και των φυτών κι ένα μέρος διηθείται στο έδαφος και είτε αποθηκεύεται ως εδαφική υγρασία κι επιστρέφει στην ατμόσφαιρα μέσω των φυτών ή κατεισδύει σε βαθύτερα στρώματα και τροφοδοτεί υπόγειους υδροφορείς (Μιμίκου και Μπαλτάς 2003). Στο διάγραμμα, που ακολουθεί, παρατίθενται εποπτικά οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, ενώ στον πίνακα 1.1 αποτυπώνεται μια εκτίμηση για την παγκόσμια κατανομή των υδατικών πόρων.



Διάγραμμα 1.1: Σχηματική απεικόνιση των διεργασιών του υδρολογικού κύκλου
 Πηγή: (<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclegreekhi.html> US Geological Survey)

Πίνακας 1.1: Παγκόσμια κατανομή υδατικών πόρων (Gleick 1996)

Εκτίμηση της παγκόσμιας κατανομής νερού			
Μορφή Νερού	Όγκος νερού σε κυβικά χιλιόμετρα	Ποσοστό γλυκού νερού	Ποσοστό συνολικού νερού
Ωκεανοί, Θάλασσες & Κόλποι	1.338.000.000	--	96,5
Παγόβουνα, Παγετώνες & Μόνιμο χιόνι	24.064.000	68,7	1,74
Υπόγειο Νερό	23.400.000	--	1,7
Γλυκό	10.530.000	30,1	0,76
Αλμυρό	12.870.000	--	0,94
Εδαφική Υγρασία	16.500	0,05	0,001
Εδαφικός πάγος & Μόνιμα παγωμένο έδαφος	300.000	0,86	0,022
Λίμνες	176.400	--	0,013
Γλυκές	91.000	0,26	0,007
Αλμυρές	85.400	--	0,006
Ατμόσφαιρα	12.900	0,04	0,001
Έλη	11.470	0,03	0,0008
Ποταμοί	2.120	0,006	0,0002
Βιολογικό Νερό	1.120	0,003	0,0001
Σύνολο	1.386.000.000	-	100

1.2 Το υδρολογικό ισοζύγιο

Οι διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, που σχολιάσθηκαν ανωτέρω, δεν είναι αυτόνομες αλλά συγκροτούν το υδρολογικό ισοζύγιο, το οποίο είναι ουσιαστικά είναι ο απολογισμός του νερού που εισέρχεται, εξέρχεται και αποθηκεύεται σε ένα υδρολογικό σύστημα.

Σε επίπεδο λεκάνης απορροής, οι εισροές είναι συννηθέστερα οι βροχοπτώσεις, οι χιονοπτώσεις και το χαλάζι, ενώ η εκροή συνίσταται από την επιφανειακή, ενδιάμεση και υπόγεια απορροή, καθώς και την εξατμισοδιαπνοή. Η αποθήκευση της λεκάνης έχει κι αυτή διάφορες συνιστώσες, όπως είναι η επιφανειακή αποθήκευση, η υπεδάφια αποθήκευση, η υπόγεια αποθήκευση και η παρεμπόδιση από βλάστηση, κλπ. Οι παραπάνω παράγοντες συνοψίζονται στην ακόλουθη βασική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου (Μιμίκου και Μπαλτάς 2003):

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

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, η μεταβολή στην αποθηκευτικότητα μιας λεκάνης απορροής είναι ίση με την ποσότητα του νερού, που πέφτει με τη μορφή κατακρήμνισης P μείον την ποσότητα του νερού που απορρέει επιφανειακά R, απορρέει υπόγεια G, εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα E και διαπνέεται από τη βλάστηση

Τ. Για μεμονωμένα επεισόδια βροχόπτωσης, οι συνιστώσες της εξάτμισης και διαπνοής είναι αρκετά μικρότερες από τις υπόλοιπες και συνήθως παραλείπονται.

Συμπερασματικά, η απορροή έχει τρεις βασικές συνιστώσες: την επιφανειακή, την ενδιάμεση και την υπόγεια. Ο διαχωρισμός αυτός είναι καθαρά χωρικός, αν και οι μαθηματικές εξισώσεις, που διέπουν κάθε είδος ροής είναι διαφορετικές. Έτσι η επιφανειακή απορροή συμβαίνει πάνω στην επιφάνεια της γης, η ενδιάμεση παρατηρείται στην ακόρεστη ζώνη και η υπόγεια στην κορεσμένη ζώνη. Φυσικά όλες οι συνιστώσες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και σε ορισμένες περιπτώσεις ο διαχωρισμός τους είναι ιδιαίτερα δύσκολος.

1.3 Υδρολογικά μοντέλα

Ο υδραυλικός μηχανικός καλείται να δώσει απαντήσεις σε πολλά ερωτήματα, τα οποία σχετίζονται με την κίνηση του νερού και την επίδραση στις υφιστάμενες κατασκευές. Κλασσικό πεδίο ενδιαφέροντος αποτελεί η επεξεργασία της συσχέτισης βροχής – απορροής, που ενδεχομένως οδηγεί στην εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων.

Στην ιδανική περίπτωση, υπάρχοντα αρχεία με χρονοσειρές του υδρολογικού ισοζυγίου κρίνονται επαρκή για την εκπόνηση μελετών. Ωστόσο, στην πραγματικότητα, επειδή σπανίως υπάρχουν επαρκή δεδομένα γίνονται προβλέψεις και μοντελοποιήσεις, είτε για τη συμπλήρωση στοιχείων, είτε για την εκτίμηση της μελλοντικής εξέλιξης ενός φαινομένου. Σε τέτοιες περιπτώσεις δημιουργούνται μοντέλα τα οποία δίνουν πληροφορίες συσχετίζοντας κάτι γνωστό - input (πχ ένα συγκεκριμένο επεισόδιο βροχόπτωσης) με κάτι άγνωστο - output (πχ η απορροή που συνεπάγεται το επεισόδιο αυτό).

Η έννοια του υδρολογικού μοντέλου θα μπορούσε να αποδοθεί ως ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων, οι οποίες απεικονίζουν κατά προσέγγιση το σύνολο των αλληλοσυσχετιζόμενων φαινομένων, που υπεισέρχονται στη διαδικασία μετατροπής της υετόπτωσης σε απορροή (Λουκάς και Μυλόπουλος 2005).

Γενικά, η λογική της ανάπτυξης και εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων, ανεξαρτήτως πολυπλοκότητας, ακολουθεί πέντε βήματα.

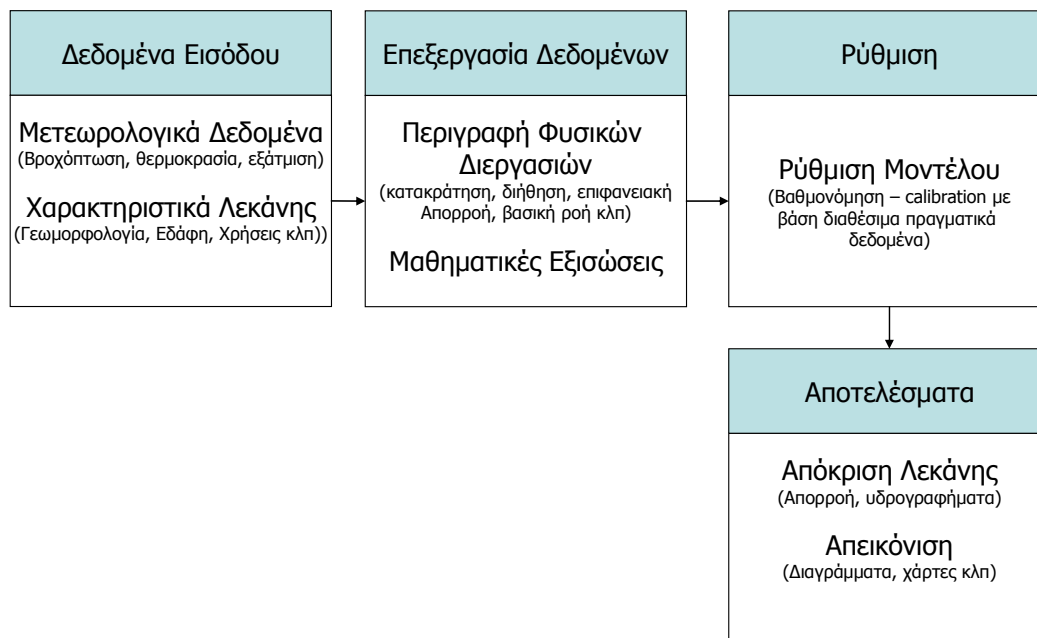
Καταρχήν, πρέπει να προσδιοριστούν οι παράμετροι, που θα ληφθούν υπόψη, αξιολογώντας τη σημασία και τη βαρύτητα που έχουν.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται μαθηματικές εξισώσεις περιγραφής των διαδικασιών του υδρολογικού συστήματος, οι λύσεις των οποίων θα πρέπει να βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων βάσει διαθέσιμων δεδομένων.

Έπειτα προετοιμάζονται τα δεδομένα (μετεωρολογικά και υδρολογικά καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη υδρολογικής λεκάνης) που θα χρησιμοποιηθούν.

Ύστερα το σύστημα πρέπει να βαθμονομηθεί με βάση διαθέσιμα δεδομένα πεδίου, όπως μετρηθείσες παροχές ποταμών.

Αφού ολοκληρωθούν τα παραπάνω βήματα, το υδρολογικό μοντέλο εκτελείται για την προσομοίωση της απόκρισης της υδρολογικής λεκάνης. Ακολούθως, δίνεται μια διαγραμματική απεικόνιση της ως άνω σχολιασθείσας λογικής δόμησης ενός υδρολογικού μοντέλου, ως αλληλουχία εισαγωγής δεδομένων, επεξεργασίας και εξαγωγής αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 1.2: Δόμηση Υδρολογικού Μοντέλου

1.4 Πλημμύρες

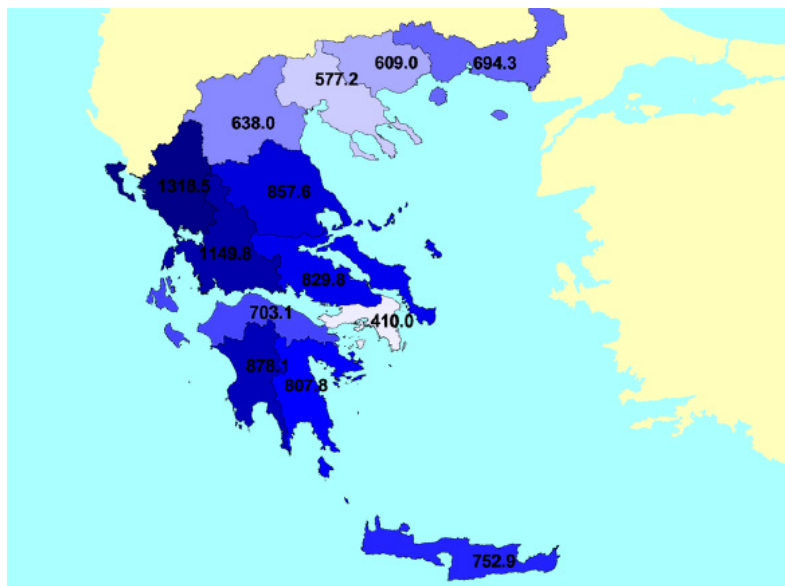
Πλημμύρα είναι η ανύψωση της στάθμης των νερών ποταμού, λίμνης, ή θάλασσας. Οφείλεται συνήθως στις κλιματολογικές συνθήκες και ενισχύεται από τη μορφολογία του εδάφους. Οι κυριότερες αιτίες που τις προκαλούν είναι οι εξής (Λέκκας 2009):

- Ραγδαίες και παρατεταμένες βροχές (φθινοπωρινές πλημμύρες)
- Ταχεία τήξη χιονιών και παγετώνων (πλημμύρες της άνοιξης)
- Ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, λόγω παλιρροιακών φαινομένων
- Εφόρμηση της θάλασσας στην ξηρά, λόγω τσουνάμι
- Απότομη διάρρηξη φράγματος τεχνητής λίμνης.

Οι πλημμύρες αποτελούν τη δεύτερη πιο συχνή φυσική καταστροφή, μετά τις δασικές πυρκαγιές, είναι αναμενόμενες και εκδηλώνονται είτε ως βραδείας εξέλιξης (ετήσιες) πλημμύρες, οι οποίες δεν προκαλούν μεγάλες καταστροφές, είτε ως ξαφνικά γεγονότα (flash floods), που έχουν σοβαρές επιπτώσεις στις ανθρώπινες κοινωνίες που πλήττουν (Λέκκας 2009).

1.5 Το καθεστώς πλημμυρών στην Ελλάδα

Η εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων στην Ελλάδα είναι -ως επί το πλείστον- απόρροια της έντονης γεωγραφικής μεταβλητότητας των κλιματικών στοιχείων λόγω της συνύπαρξης ανεπτυγμένης ακτογραμμής και ορογραφίας (Ράμπιας 2007). Σε αυτήν την κατεύθυνση η οροσειρά της Πίνδου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και αποτελεί ένα «υδρολογικό σύνορο» μιας και η μέση ετήσια βροχόπτωση στη Δυτική Ελλάδα είναι της τάξης των 1800mm ενώ στα Ανατολικά το αντίστοιχο μέγεθος είναι περίπου 400mm. Στο ακόλουθο σχήμα, παρατίθενται οι μέσες υπερετήσιες βροχοπτώσεις ανά υδατικό διαμέρισμα στην Ελλάδα για το διάστημα 1960-1990.



Σχήμα 1.1: Μέση υπερετήσια βροχόπτωση (mm) για την περίοδο 1960 –1990 ανά υδατικό διαμέρισμα, Πηγή: (<http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr> ΕΤΥΜΠ)

Ωστόσο, η παρατήρηση σχετικά με την ανομοιομορφία των βροχοπτώσεων δεν συμβαδίζει και με αντίστοιχη εκδήλωση πλημμυρικών γεγονότων στο ανατολικό και δυτικό μέρος της χώρας. Συνεπώς, παρότι οι βροχοπτώσεις στα δυτικά είναι κατά περίπου τρεις φορές μεγαλύτερες απ' ότι στα ανατολικά, οι πλημμυρικές απορροές στα ανατολικά είναι κατά πολύ συχνότερες.

Ο πλημμυρικός κίνδυνος αυξάνεται λόγω μιας σειράς παραγόντων, που δεν σχετίζονται με την ένταση του γεγονότος βροχόπτωσης. Τέτοιοι παράγοντες είναι ενδεικτικά (Λέκκας 2009):

- Ο δραστικός περιορισμός της κοίτης των ρευμάτων στις οικιστικές περιοχές λόγω της ανεξέλεγκτης δόμησης.
- Ο φραγμός των κοιτών από τη δόμηση, την απόρριψη αδρανών υλικών ή και την άστοχη κατασκευή τεχνικών έργων.
- Η καταστροφή των δασών από τις πυρκαγιές και την αποψίλωση που βρίσκονται προς τα ανάντη μέσα στη λεκάνη απορροής.
- Η μείωση της κατείδυσης και η παράλληλη αύξηση της επιφανειακής απορροής λόγω της κάλυψης της εδαφικής επιφάνειας από την αστικοποίηση.
- Η άστοχη κατασκευή «αντιπλημμυρικών έργων» που δεν είναι συμβατά με το περιβάλλον και τις εξελισσόμενες κλιματολογικές διεργασίες στην επιφάνεια.

1.6 Η κοινοτική οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου

Η νέα οδηγία 2007/60 για τη διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου αποτελεί ένα συμπλήρωμα στην κοινοτική νομοθεσία για την ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων. Η οδηγία καλύπτει κάθε τύπο πλημμύρας, ανεξαρτήτως εάν προήλθε από ποτάμια και λίμνες, εάν εκδηλώθηκε σε αστικές και παράκτιες περιοχές ή αν ήταν αποτέλεσμα καταιγίδας ή παλιρροϊκών κυμάτων.

Σκοπός της οδηγίας είναι η θέσπιση ενός πλαισίου αξιολόγησης και διαχείρισης των κινδύνων που συνδέονται με τις πλημμύρες ιδίως στην ανθρώπινη υγεία και ζωή, στο περιβάλλον, στην πολιτιστική κληρονομιά, στην οικονομική δραστηριότητα και στις υποδομές. Τα μέτρα για τη μείωση των κινδύνων θα πρέπει, σύμφωνα με την οδηγία, να συντονίζονται σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού για να είναι αποτελεσματικά.

Κύρια σημεία της οδηγίας είναι η προκαταρκτική αξιολόγηση των κινδύνων πλημμύρας, χαρτογράφηση σε όλες τις περιοχές όπου υπάρχει σημαντικός κίνδυνος πλημμύρας, συντονισμός για κοινές λεκάνες απορροής ποταμών και εκπόνηση σχεδίων διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας με ευρεία συμμετοχική διαδικασία.

Ειδικότερα, η εφαρμογή της οδηγίας στα κράτη μέλη θα γίνει σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο θα είναι μια προκαταρκτική εκτίμηση της πλημμυρικής επικινδυνότητας στις λεκάνες απορροής ποταμών και στις αντίστοιχες παράκτιες ζώνες και θα έχει ολοκληρωθεί μέχρι το 2011. Κατά το στάδιο αυτό θα περιλαμβάνονται τουλάχιστον τα εξής (ΕΚ 2007):

- χάρτες της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού στην κατάλληλη κλίμακα, οι οποίοι περιλαμβάνουν τα όρια των λεκανών και των υπολεκανών απορροής ποταμών, και εφόσον υπάρχουν, παράκτιων ζωνών, οι οποίοι περιγράφουν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και τη χρήση γης
- περιγραφή των πλημμυρών οι οποίες σημειώθηκαν κατά το παρελθόν και είχαν σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στις ανθρώπινες ζωές, στις οικονομικές δραστηριότητες και στο περιβάλλον, όταν υπάρχει ακόμη πιθανότητα παρόμοιων μελλοντικών συμβάντων, συμπεριλαμβανομένων της έκτασης της πλημμύρας, των οδών αποστράγγισης και της αξιολόγησης των αρνητικών επιπτώσεων που προκάλεσαν
- περιγραφή των σημαντικών πλημμυρών, οι οποίες σημειώθηκαν κατά το παρελθόν, εκ των οποίων θα μπορούσαν, ενδεχομένως, να προβλεφθούν οι σημαντικές αρνητικές συνέπειες παρόμοιων φαινομένων στο μέλλον,
- αξιολόγηση των δυνητικών αρνητικών συνεπειών των μελλοντικών πλημμυρών στην ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και την οικονομική δραστηριότητα, λαμβανομένων υπόψη στο μέτρο του δυνατού ζητημάτων όπως η τοπογραφία, η θέση των υδατορευμάτων και τα γενικά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους, συμπεριλαμβανομένων των πλημμυρικών περιοχών ως φυσικών επιφανειών κατακράτησης, η αποτελεσματικότητα των υφισταμένων τεχνητών υποδομών προστασίας από τις πλημμύρες, η θέση των κατοικημένων περιοχών και των περιοχών οικονομικής δραστηριότητας καθώς και οι μακροπρόθεσμες εξελίξεις,

συμπεριλαμβανομένων των επιδράσεων της αλλαγής του κλίματος στη συχνότητα επέλευσης των συμβάντων πλημμύρας.

Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την εκπόνηση χαρτών πλημμυρικού κινδύνου μέχρι το 2013 (χάρτες πλημμυρικών κατακλύσεων και πλημμυρικής επικινδυνότητας). Στους χάρτες θα προσδιορίζονται ζώνες υψηλής, μεσαίας και χαμηλής επικινδυνότητας, συμπεριλαμβανομένων περιοχών, όπου η εμφάνιση πλημμύρας μπορεί να θεωρηθεί ακραίο φαινόμενο. Οι χάρτες θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνουν λεπτομέρειες, όπως προβλεπόμενο βάθος υδάτων, έκταση πλημμύρας, ταχύτητα ροής υδάτων, οικονομικές δραστηριότητες που μπορεί να θιγούν, αριθμό κατοίκων που θα διατρέξουν κίνδυνο και δυνητική περιβαλλοντική ζημία. Στην κοινωτική οδηγία δεν περιλαμβάνεται σχολιασμός για τη διάρκεια της παραμονής των υδάτων σε μια περιοχή, κάτι το οποίο είναι αρκετά σημαντικό.

Κατά το τρίτο στάδιο, τα κράτη μέλη θα εκπονήσουν υποχρεωτικά σχέδια διαχείρισης της επικινδυνότητας μέχρι το 2015. Τα σχέδια αυτά θα περιλαμβάνουν μέτρα μείωσης της πιθανότητας πλημμύρας και των συνεπειών της, θα εστιάζονται δε στην απαγόρευση μη αειφόρων πρακτικών ως προς τις χρήσεις γης, αποτρέποντας, για παράδειγμα, την οικοδόμηση σε περιοχές επιρρεπείς σε πλημμύρες. Τα σχέδια θα πρέπει επίσης να προβλέπουν τρόπους θωράκισης τέτοιων περιοχών από το ενδεχόμενο πλημμύρας και μείωσης των δυνητικών επιπτώσεων. Άλλη σημαντική πτυχή των σχεδίων διαχείρισης της επικινδυνότητας είναι η ανάγκη προετοιμασίας του πληθυσμού για το ενδεχόμενο πλημμύρας. Οι εκτιμήσεις επικινδυνότητας για πλημμυρικά φαινόμενα θα επανεξετάζονται και θα αναπροσαρμόζονται αναλόγως των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής καθώς και της έντασης και της συχνότητας των πλημμυρικών φαινομένων μακροπρόθεσμα.

1.7 Αντικείμενο της εργασίας και περιγραφή της μεθοδολογίας

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας έγκειται στη διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης μέσω της αξιοποίησης υδρολογικών και υδραυλικών δεδομένων και την ενσωμάτωση αυτών σε υπολογιστικό περιβάλλον λογισμικών επεξεργασίας γεωγραφικής και υδρολογικής πληροφορίας.

Τα υδρολογικά μοντέλα, που παρουσιάζονται, έχουν αναπτυχθεί από το σώμα μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού (Hydrologic engineering centre) και

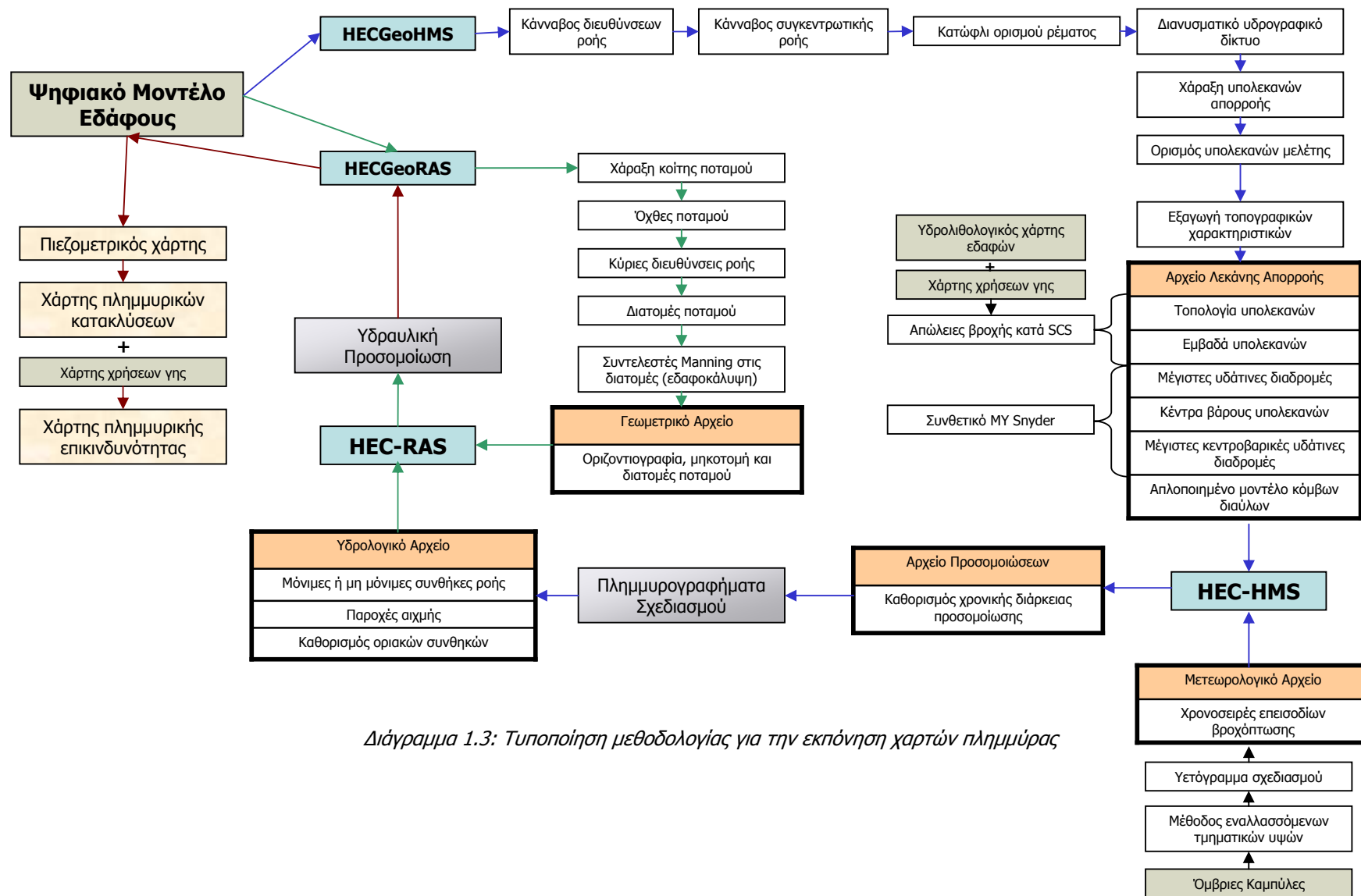
συνεργάζονται με το ευρέως διαδεδομένο σύστημα γεωγραφικής πληροφορίας ARC-Map της ESRI.

Ως περιοχή μελέτης, επελέγη ο Νόμος Αρκαδίας και ειδικότερα η άνω λεκάνη απορροής του ποταμού Αλφειού. Ωστόσο, πρωταρχικός στόχος της εργασίας δεν είναι τόσο η εφαρμογή σε μια συγκεκριμένη περιοχή, αλλά η συγκρότηση ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου με τη βήμα προς βήμα ανάλυση όλων των απαραίτητων υπολογιστικών διεργασιών για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας. Συνοπτικά η μεθοδολογία, που αναπτύσσεται λεπτομερώς στα ακόλουθα κεφάλαια, θεμελιώνεται στους εξής άξονες:

- Επεξεργασία γεωγραφικής πληροφορίας σε δεδομένο ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής μελέτης – οριοθέτηση βασικών στοιχείων γεωμετρίας και τοπολογίας των λεκανών απορροής και του υδρογραφικού δικτύου (Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-GeoHMS)
- Υπολογισμός της υδρολογικής απόκρισης της υπό μελέτη λεκάνης και εξαγωγή υδρογραφημάτων (Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-HMS)
- Ανάλυση επιλεχθέντος φυσικού υδατορεύματος για την οριοθέτηση στοιχείων γεωμετρίας (Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-GeoRAS)
- Υδραυλική μονοδιάστατη προσομοίωση του φυσικού υδατορεύματος σε συνθήκες μόνιμης ροής (Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-RAS)
- Αξιοποίηση των στοιχείων της προσομοίωσης για τη δημιουργία των χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης της λεκάνης (Ανάλυση σε περιβάλλον HEC-GeoRAS)

Στον πίνακα Π-1 του παραρτήματος παρατίθενται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν, η έκδοσή τους καθώς και ο ρόλος που εξυπηρέτησαν στο μεθοδολογικό πλαίσιο.

Στο διάγραμμα 1.3 δίνεται το τελικώς καταρτισθέν ολοκληρωμένο διάγραμμα τυποποίησης της διαδικασίας για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας.



Διάγραμμα 1.3: Τυποποίηση μεθοδολογίας για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας

1.8 Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παρατίθενται μερικά βασικά θεωρητικά στοιχεία για τον υδρολογικό κύκλο, το υδρολογικό ισοζύγιο αλλά και την υδρολογία πλημμυρών με μνείες για την υφιστάμενη κατάσταση στον Ελληνικό χώρο. Επίσης, δίνονται τα βασικότερα στοιχεία της οδηγίας 2007/60/EK για τη διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου αλλά και το χρονοδιάγραμμα υλοποίησης, που έχει τεθεί από την κοινότητα. Τέλος, παρουσιάζεται το τελικό διάγραμμα για την τυποποίηση της διαδικασίας εκπόνησης χαρτών πλημμύρας, το οποίο άλλωστε αποτέλεσε θεμελιώδη στόχο της παρούσας εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική και περιεκτική ανάλυση της περιοχής μελέτης με παράθεση χαρτών για τις χρήσεις γης, τους τύπους εδαφών και των υψομέτρων εδάφους, καθώς επίσης και για την ακριβή γεωγραφική τοποθέτηση του τμήματος του ποταμού Αλφειού, που τελικά προσομοιώθηκε.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται βήμα προς βήμα όλη η διαδικασία για την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης της άνω λεκάνης του ποταμού Αλφειού στο Ν. Αρκαδίας ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο η αντίστοιχη διαδικασία για την υδραυλική προσομοίωση επιλεχθέντος τμήματος 20 περίπου km του ποταμού. Ιδιαίτερη σημασία και στα δύο αυτά κεφάλαια δόθηκε στην ανάλυση του επιστημονικού υποβάθρου, το οποίο διέπει την εκτέλεση των μοντέλων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα τόσο της υδρολογικής ανάλυσης για την απόκριση της λεκάνης, όσο και της υδραυλικής προσομοίωσης του φυσικού υδατορεύματος. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά οι χάρτες πιεζομετρικών βαθών και οι χάρτες πλημμυρικής κατάκλυσης για 6 περιόδους επαναφοράς (2,10,20,50,100,1000 έτη).

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει το γενικό σχολιασμό των αποτελεσμάτων, την εξαγωγή των συμπερασμάτων από τη χρήση των μοντέλων, καθώς και προτάσεις για μελλοντική μετεξέλιξη της εργασίας.

Κεφάλαιο 2 Η Περιοχή Μελέτης



Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται στοιχεία για τη γεωγραφική τοποθέτηση της περιοχής μελέτης, η οποία βρίσκεται στην Άνω λεκάνη του Αλφειού ποταμού στην ευρύτερη περιοχή της Μεγαλόπολης Αρκαδίας και των γύρω οικισμών.

Θεματικοί Άξονες Κεφαλαίου

- *Γεωγραφικά και ιστορικά στοιχεία λεκάνης Αλφειού ποταμού*
- *Χάρτες χρήσεων γης, εδαφολογικών τύπων, υψομέτρων και κλίσεων εδάφους*

2 Η Περιοχή Μελέτης

2.1 Ο ποταμός Αλφειός

Ο ποταμός, σύμφωνα με το Στράβωνα, ονομάστηκε «Αλφειός» επειδή θεράπευε τη λέπρα, καθότι Αλφός ονομαζόταν στην αρχαιότητα μια μορφή λέπρας. Ακόμη αλφ- σημαίνει και λευκότητα και δημητριακά, αλφή είναι το κέρδος και άλφιτου το πλιγούρι από κριθάρι (<http://www.minagric.gr/greek/2.9.3.alfeios.html>).

Ο Αλφειός είναι ο μεγαλύτερος σε μήκος (112 km) και παροχή (ετήσιο δυναμικό $2100 \times 10^6 \text{ m}^3$ ύδατος) ποταμός της Πελοποννήσου (Μαριαiotis and Γιαννοπουλος 2001) και η υδρολογική του λεκάνη καλύπτει έκταση 3.658 km^2 (βλ. σχήμα 2.1). Πηγάζει από τα αρκαδικά οροπέδια με τρεις παραπόταμους (Άνω Αλφειό, Ερύμανθο, Λάδωνα), που ενώνονται στην ημιορεινή Ηλεία (Μέσος Αλφειός), και εκβάλλει στον Κυπαρισσιακό Κόλπο (Κάτω Αλφειός).



Σχήμα 2.1: Πλήρης έκταση του ποταμού Αλφειού στους νομούς Αρκαδίας, Μεσσηνίας και Ηλείας (<http://upload.wikimedia.org/>)

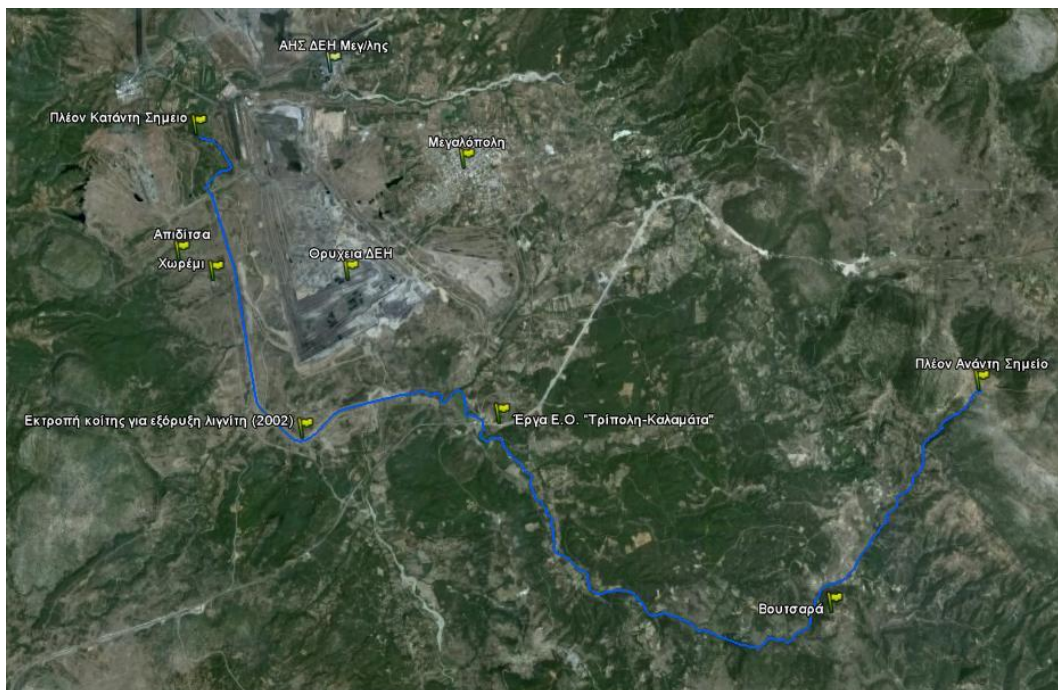
Κατά μήκος του ποταμού και των παραποτάμων του έχουν αναπτυχθεί δραστηριότητες, όπως οικισμοί, τουρισμός, γεωργία, αγροτικές και βιομηχανικές επιχειρήσεις, άντληση ή εκτροπή νερού για άρδευση ή ύδρευση, κατασκευή έργων υποδομής (φράγματα, αναχώματα, γέφυρες), λήψη αμμοχάλικου καθώς και εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΗΣ Μεγαλόπολης). Οι ανωτέρω παραποτάμιες δραστηριότητες επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα την ποιότητα του νερού

και γενικότερα την οικολογική κατάσταση του Αλφειού ποταμού (Manariotis and Yannopoulos 2001).

2.2 Η υπό μελέτη λεκάνη απορροής του Αλφειού

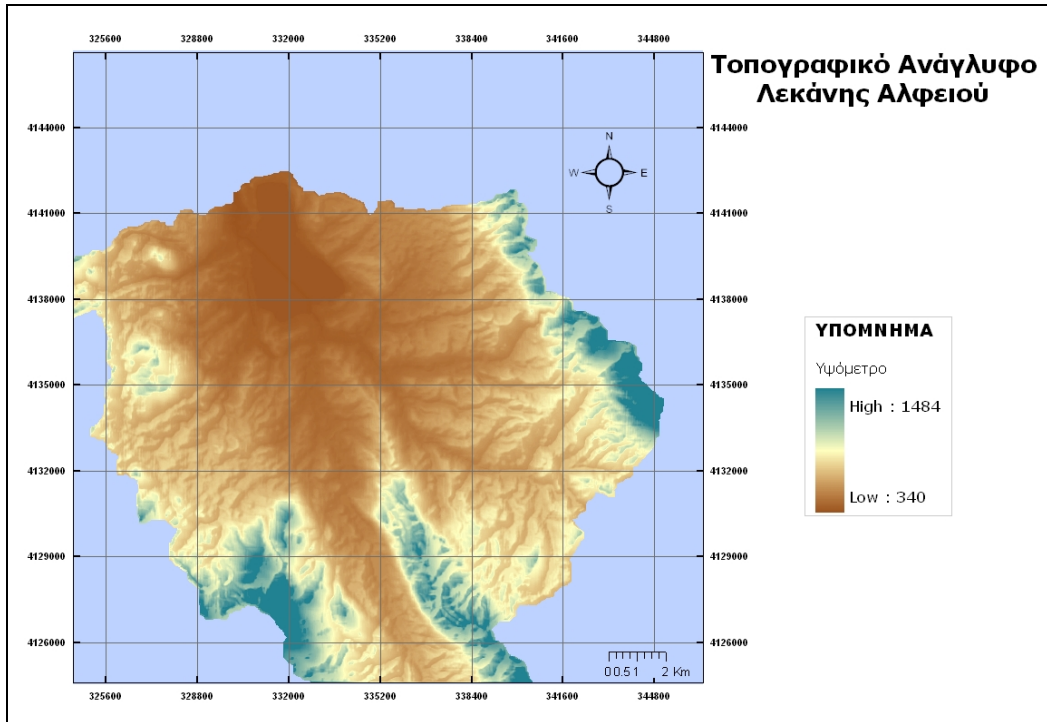
Η λεκάνη απορροής του Αλφειού ποταμού μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη (υπολεκάνες), την άνω (250 km²), τη μεσαία (3048 km²) και την κάτω υπολεκάνη (362 km²). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετάται η άνω λεκάνη απορροής.

Στο σχήμα 2.2 απεικονίζεται η πλήρης γεωγραφική τοποθέτηση του τμήματος μελέτης με επισημάνσεις σημαντικών οικισμών, έργων υποδομής και εγκαταστάσεων.

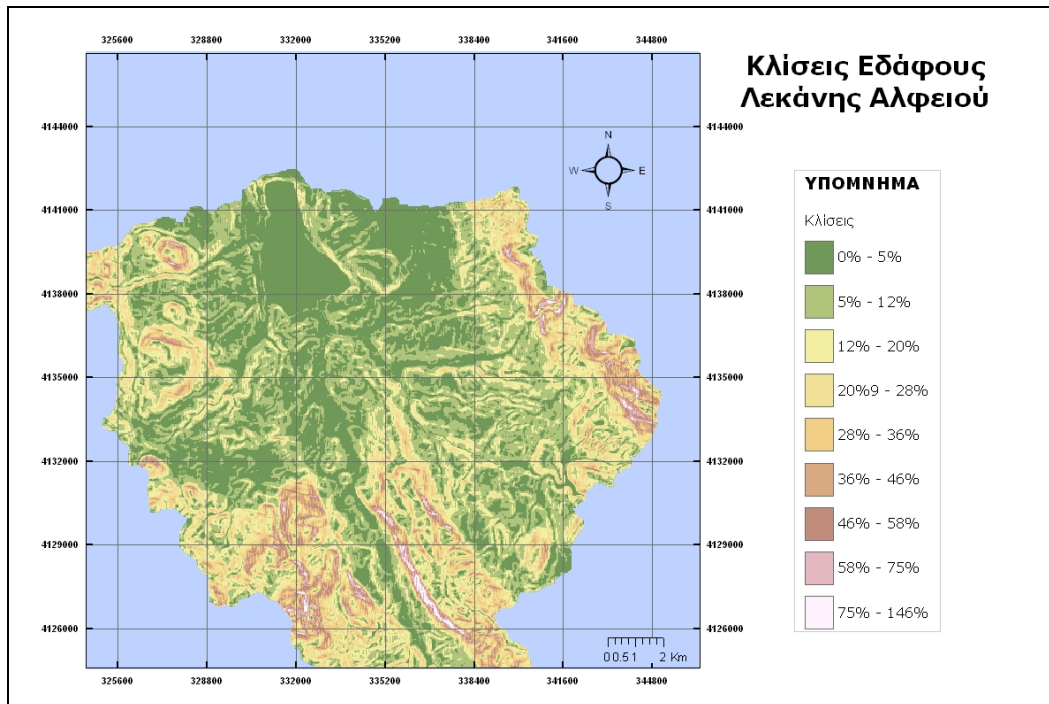


Σχήμα 2.2: Γεωγραφική τοποθέτηση της περιοχή μελέτης (Google earth – μετά από επεξεργασία)

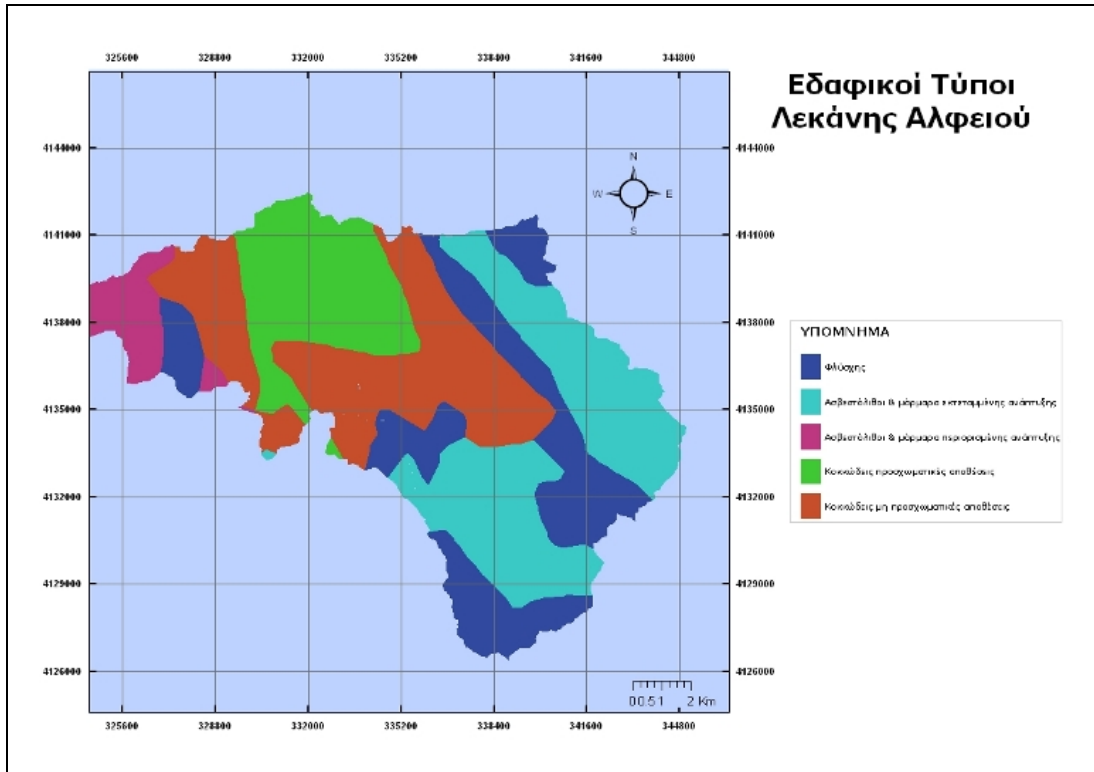
Σε ό,τι αφορά το τοπογραφικό ανάγλυφο της λεκάνης, το υψόμετρο κυμαίνεται από 340 m έως 1484 m (βλ. χάρτη 2.1), ενώ συγκρινόμενο με τις κλίσεις εδάφους (βλ. χάρτη 2.2) και τις χρήσεις γης (βλ. χάρτη 2.4) παρατηρείται εύλογη κάλυψη χρήσεων καλλιέργειας γης στις περιοχές ήπιας κλίσης. Τέλος, παρατηρώντας και τους τύπους εδαφών (βλ. χάρτη 2.3) παρατηρείται κάλυψη από ασβεστόλιθο και φλύσχη στις μεγάλες κλίσεις και προσχωματικές αποθέσεις άμμου και ιλύος στις ήπιες κλίσεις.



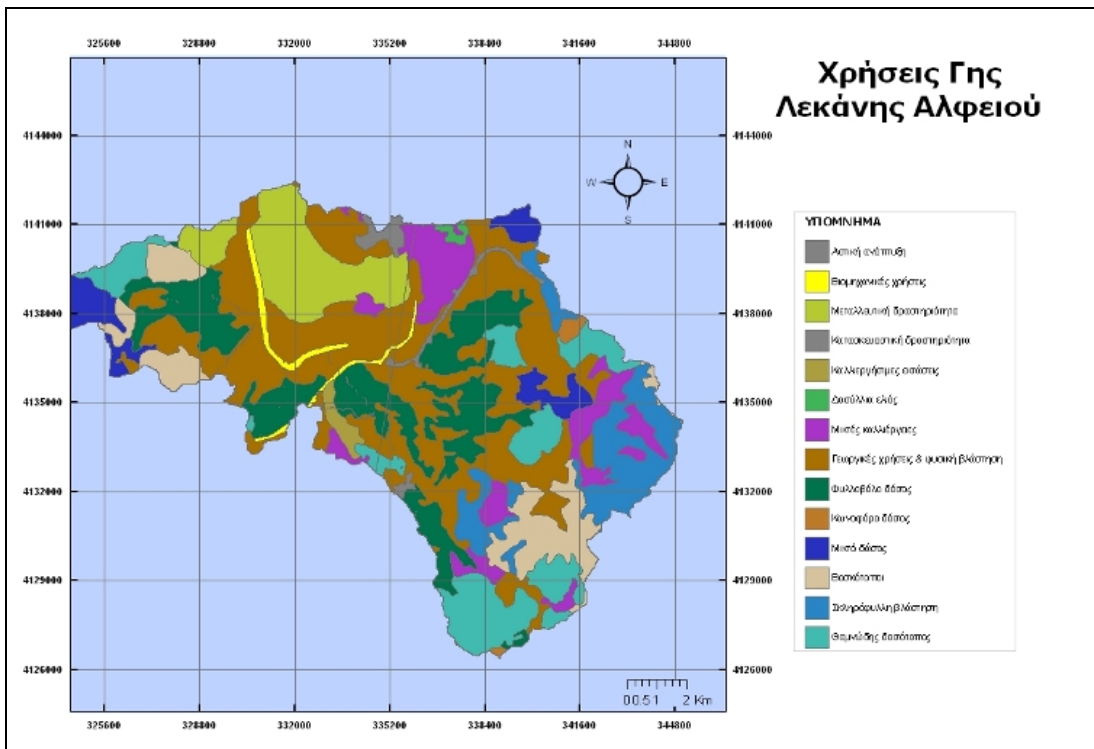
Χάρτης 2.1: Τοπογραφικό ανάγλυφο Λεκάνης Αλφειού ποταμού



Χάρτης 2.2: Κλίσεις εδάφους Λεκάνης Αλφειού Ποταμού

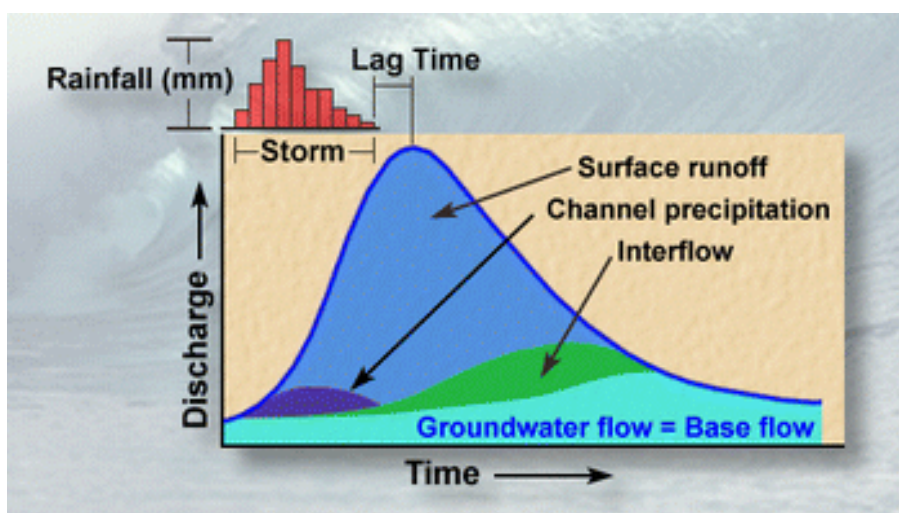


Χάρτης 2.3: Εδαφικοί τύποι Λεκάνης Αλφειού Ποταμού
(EC Project Corine <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/> - μετά από επεξεργασία)



Χάρτης 2.4: Χρήσεις γης Λεκάνης Αλφειού Ποταμού
(EC Project Corine <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/> - μετά από επεξεργασία)

Κεφάλαιο 3 *Υδρολογική Προσομοίωση της Λεκάνης Απορροής*



Περίληψη

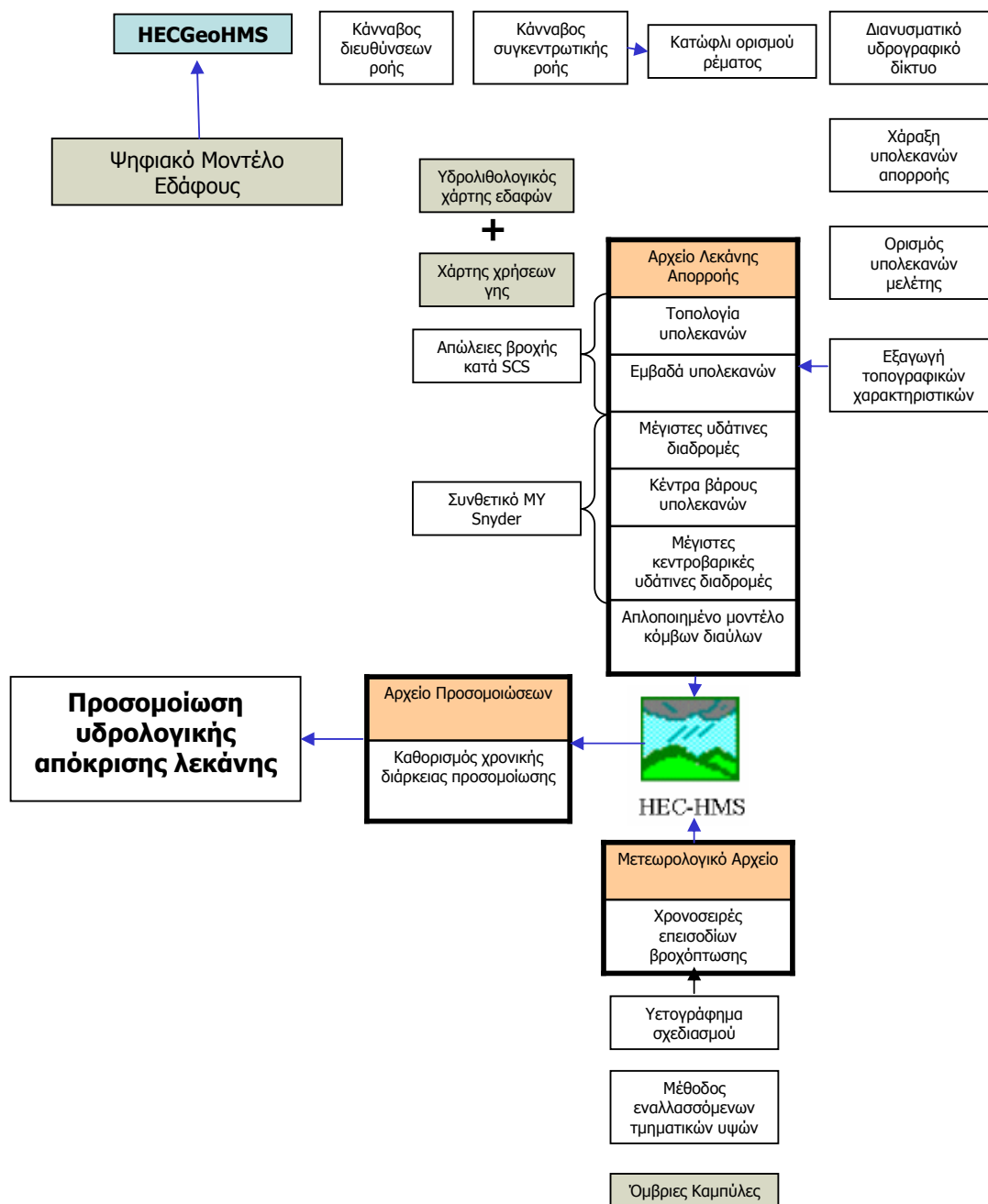
Στο κεφάλαιο αυτό δίδεται βήμα προς βήμα η σύνθεση της μεθοδολογίας για την εκτίμηση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης απορροής σε συγκεκριμένα επεισόδια βροχόπτωσης. Η ανάλυση γίνεται στο περιβάλλον των λογισμικών HEC-GeoHMS και HEC-HMS και έχει ως τελικό εξαγόμενο το πλημμυρογράφημα σχεδιασμού της λεκάνης για κάθε περίοδο επαναφοράς.

Θεματικοί Άξονες Κεφαλαίου

- Γεωμορφολογική και υδρολογική ανάλυση λεκάνης μελέτης
- Δόμηση υδρολογικού μοντέλου για την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης

3 Υδρολογική Προσομοίωση της Λεκάνης Απορροής

Στο ακόλουθο εποπτικό διάγραμμα δίνεται η αλληλουχία των λειτουργιών του προγράμματος HEC-HMS για την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης μελέτης.



Διάγραμμα 3.1: Διαδικασία εκτέλεσης υδρολογικής προσομοίωσης μέσω HEC-HMS

3.1 Γεωμορφολογική και Υδρολογική Ανάλυση Λεκάνης

Η ανάλυση των γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης πραγματοποιείται μέσω της επέκτασης HEC-GeoHMS του ArcMap και της εργαλειοθήκης ArcHydro.

Το HEC-GeoHMS είναι μια επέκταση του ArcMap και αναπτύχθηκε ως ένα γεωχωρικό (geo-spatial) εργαλείο υδρολογίας για υδρολόγους μηχανικούς με περιορισμένη εμπειρία σε συστήματα γεωγραφικής πληροφορίας. Το πρόγραμμα επιτρέπει στο χρήστη να οπτικοποιεί τη χωρική πληροφορία, να καταγράφει χαρακτηριστικά της λεκάνης, να οριοθετεί τις υπολεκάνες και τα ρέματα, να παράγει αρχεία εισόδου σε υδρολογικά μοντέλα κλπ.

Το HEC-GeoHMS χρησιμοποιεί ως εισόδους το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), τους ψηφιακούς χάρτες με τους τύπους εδαφών και χρήσεων γης και κάποια βοηθητικά αρχεία χωρικών δεδομένων υπό διανυσματική μορφή, όπως για παράδειγμα το υδρογραφικό δίκτυο. Η επεξεργασία και η ανάλυση αυτών των χωρικών δεδομένων συνίσταται στη χάραξη των υπολεκάνων απορροής και του υδρογραφικού δικτύου και τον προσδιορισμό των υδρολογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών τους, σε μορφή συμβατή για χρήση τους από το HEC-HMS.

Σαν αποτέλεσμα της εκτέλεσης του προγράμματος έχουμε τη δημιουργία δύο αρχείων εισόδου: το πρώτο είναι το αρχείο χάρτη (background map file) και το δεύτερο το αρχείο του μοντέλου της λεκάνης απορροής (basin model file) σε ενιαία ή καταμεμημένη μορφή. Στο αρχείο χάρτη οπτικοποιούνται οι υπολεκάνες απορροής και τα υδατορεύματα της περιοχής μελέτης. Το αρχείο του μοντέλου της λεκάνης απορροής περιέχει τα υδρολογικά και γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης. Τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου, που απαιτούνται για τη λειτουργία του HEC-HMS, είναι τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα παρατηρημένα πλημμυρογραφήματα, καθώς επίσης και ορισμένες παράμετροι για την εφαρμογή των μαθηματικών προτύπων του HEC-HMS.

Οι εργασίες που επιτελούνται είναι οι εξής:

- Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους μέσω του πακέτου εντολών Terrain Pre-Processing
- Επεξεργασία λεκάνης και εξαγωγή υδρολογικών και γεωμορφολογικών δεδομένων
- Επιλογή προτύπων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων και δημιουργία αρχείων εισόδου HEC-HMS

3.1.1 Προεπεξεργασία του μοντέλου εδάφους μέσω του πακέτου εντολών Terrain Pre-Processing

Για την εκκίνηση της διαδικασίας απαιτείται - ως πρωτογενές δεδομένο - το ψηφιακό μοντέλο εδάφους³. Μέσα από τις επιλογές Terrain Preprocessing της εργαλειοθήκης ArcHydro του ArcGIS γίνεται επεξεργασία των γεωμορφολογικών και υδρολογικών χαρακτηριστικών του μοντέλου εδάφους. Οι εντολές, που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω, παρατίθενται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Εντολές του μενού Terrain Pre-Processing

Εντολή	Ενεργοποίηση
DEM reconditioning	Terrain Preprocessing => DEM Manipulation => DEM reconditioning.
Fill sinks	Terrain Preprocessing => DEM Manipulation => Fill Sinks.
Flow direction	Terrain Preprocessing => Flow Direction
Flow accumulation	Terrain Preprocessing => Flow Accumulation
Stream definition	Terrain Preprocessing => Stream definition
Stream Segmentation	Terrain Preprocessing => Stream Segmentation
Catchment Grid Delineation	Terrain Preprocessing => Catchment Grid Delineation
Catchment Polygon Processing	Terrain Preprocessing => Catchment Polygon Processing
Drainage Line Processing	Terrain Preprocessing => Drainage Line Processing
Adjoint Catchment Processing	Terrain Preprocessing => Adjoint Catchment Processing

Η εντολή «DEM reconditioning»

Η εντολή αυτή ανακατατάσσει τα κελιά του καννάβου του ψηφιακού μοντέλου εδάφους κατά μήκος των ρεμάτων με σκοπό να διορθώσει λανθασμένα ή ελλιπή υψόμετρα. Η λειτουργία αυτή είναι απαραίτητη, καθώς στο αρχικό μοντέλο εδάφους πιθανότατα υπάρχουν ελλιπή δεδομένα αποτύπωσης της υψομετρίας κατά μήκος των ρεμάτων κάτι το οποίο μπορεί να διορθωθεί με την αξιοποίηση του ψηφιοποιημένου υδρογραφικού δικτύου (Merwade 2008). Μάλιστα, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο

³ Στην παρούσα εργασία το πρωτογενές ΨΜΕ παραχωρήθηκε από τον τομέα Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος ΕΜΠ. Η τελική μορφή του μετά την επεξεργασία παρατέθηκε στο χάρτη 2.1.

της υδρολογικής προσομοίωσης, αλλά και στα συμπεράσματα της παρούσας χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές για τη βέλτιστη αναδιανομή των υψομέτρων, ούτως ώστε να επιτευχθεί η ακριβέστερη αποτύπωση της κοίτης του ποταμού.

Η εντολή «Fill Sinks»

Κατά τη δημιουργία του ΨΜΕ προκύπτουν ψευδή βυθίσματα στο ανάγλυφο. Τα βυθίσματα αυτά πρέπει να διορθωθούν, ώστε να μην υπάρχουν μικρά τμήματα της λεκάνης, όπου το νερό εγκλωβίζεται, παρακλύοντας την υδρολογική ανάλυση.

Η εντολή «Flow direction»

Χρησιμοποιώντας το διορθωμένο ΨΜΕ γίνεται ο προσδιορισμός της λεκάνης απορροής και του υδρολογικού δικτύου που βρίσκονται εντός της περιοχής. Για να γίνει αυτό θα πρέπει αρχικά να προσδιοριστεί ο κάνναβος με τις διευθύνσεις απορροής.

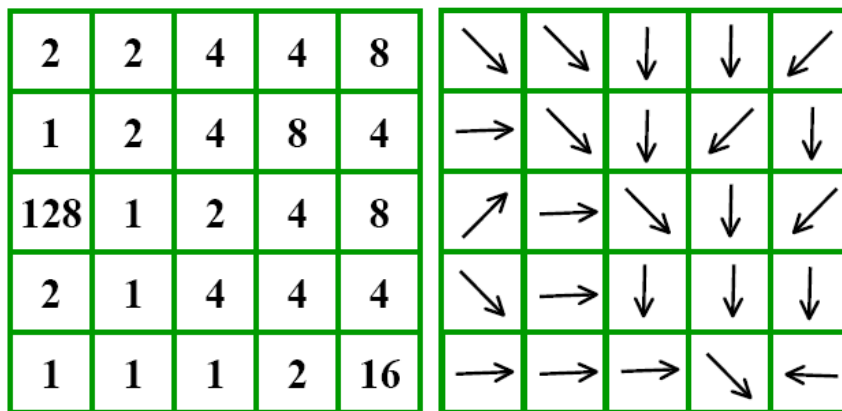
Η βασική αρχή του καννάβου απορροής είναι ότι απορροή υπάρχει από κάθε εικονοστοιχείο του ψηφιακού μοντέλου εδάφους προς ένα μόνο από τα 8 γειτονικά εικονοστοιχεία (με βάση τη μεγαλύτερη κλίση). Η κλίση μεταξύ ενός εικονοστοιχείου και ενός γειτονικού του υπολογίζεται από τη διαφορά των υψομέτρων τους διαιρεμένη με $\sqrt{2}$ όταν το γειτονικό εικονοστοιχείο βρίσκεται διαγώνια του αρχικού (4 από τα 8 εικονοστοιχεία) και με 1 για τα υπόλοιπα 4 εικονοστοιχεία. Ανάλογα με τη διεύθυνση της απορροής, το εικονοστοιχείο παίρνει μια τιμή, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.



1= ανατολικά, 2= νοτιοανατολικά
 4= νότια, 8= νοτιοδυτικά
 16= δυτικά, 32= βορειοδυτικά
 64= βόρεια, 128= βορειοανατολικά

Σχήμα 3.1: Τιμή κεντρικού εικονοστοιχείου ανάλογα με τη διεύθυνση απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη 2009)

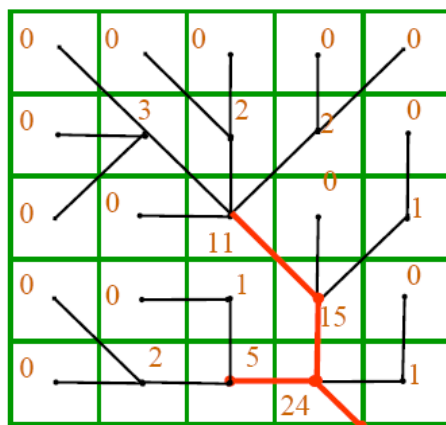
Η ολοκλήρωση της ως άνω διαδικασίας έχει ως εξαγόμενο τη δημιουργία του τελικού καννάβου διευθύνσεων απορροής (βλ. σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Κανάβος διευθύνσεων απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη 2009)

Η εντολή «Flow Accumulation»

Η συγκεντρωτική ροή για κάθε φατνίο του καννάβου ισούται με το άθροισμα των γειτονικών φατνίων, που απορρέουν σε αυτό. Τα φατνία συγκεντρωτικής ροής με υψηλές τιμές αντιστοιχούν στις μισογάγγειες ενώ τα φατνία με μηδενικές τιμές αντιστοιχούν στις κορυφογραμμές (βλ. σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Κανάβος Αθροίσματος Φατνίων Απορροής (Στάμου και Σκοπελίτη 2009)

Το βήμα αυτό καθορίζει τον αριθμό των ανάντη κελιών, που αποστραγγίζονται σε ένα συγκεκριμένο κελί. Το εμβαδόν της ανάντη περιοχής αποστράγγισης μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την τιμή της συσσώρευσης της ροής στο κατάντη κελί με το εμβαδόν του κελιού.

Η εντολή «Stream Definition»

Η εντολή επιλέγει όλα τα κελιά, που παρουσιάζουν συσσώρευση ροής μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή που έχει προσδιοριστεί από το χρήστη. Τα επιλεγθέντα κελιά καταρτίζουν το δίκτυο ροής. Η προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή είναι

ιση με το 1% της μεγαλύτερης περιοχής αποστράγγισης σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής.

Η εντολή «Stream Segmentation»

Η εντολή αυτή διαιρεί το υδατόρεμα σε μικρότερα κομμάτια με βάση την κατηγοριοποίηση του υδρογραφικού δικτύου (πχ με τη μέθοδο Strahler).

Η εντολή «Catchment Grid Delineation»

Το βήμα αυτό δημιουργεί έναν υδροκρίτη για κάθε τμήμα του υδατορέματος, σχηματίζοντας έτσι υπολεκάνες.

Η εντολή «Catchment Polygon Processing»

Η εντολή αυτή μετατρέπει την αναπαράσταση των υπολεκανών από μορφή grid σε διανυσματική μορφή (vector)

Η εντολή «Drainage Line Processing»

Η εντολή αυτή επιτελεί ακριβώς την ίδια λειτουργία με την προηγούμενη. Μετατρέπει το υδρογραφικό δίκτυο από μορφή GRID σε διανυσματική μορφή.

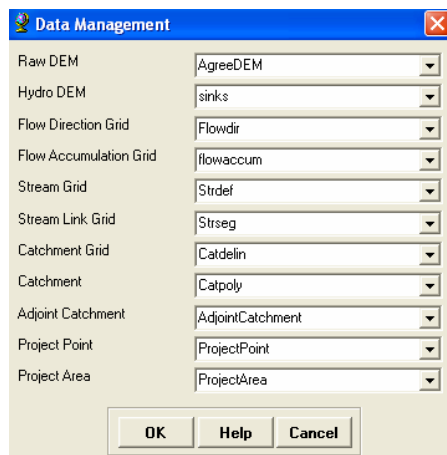
Η εντολή «Adjoint Catchment Processing»

Το βήμα αυτό αθροίζει όλες τις ανάντη υπολεκάνες σε κάθε συμβολή του ποταμού. Αυτό είναι ένα αναγκαίο βήμα, το οποίο πραγματοποιείται για να βελτιώσει την υπολογιστική ισχύ του προγράμματος και δεν έχει κάποια υδρολογική σημασία (HEC 2003).


3.1.2 Επεξεργασία λεκάνης και δημιουργία αρχείων εισόδου HEC-HMS

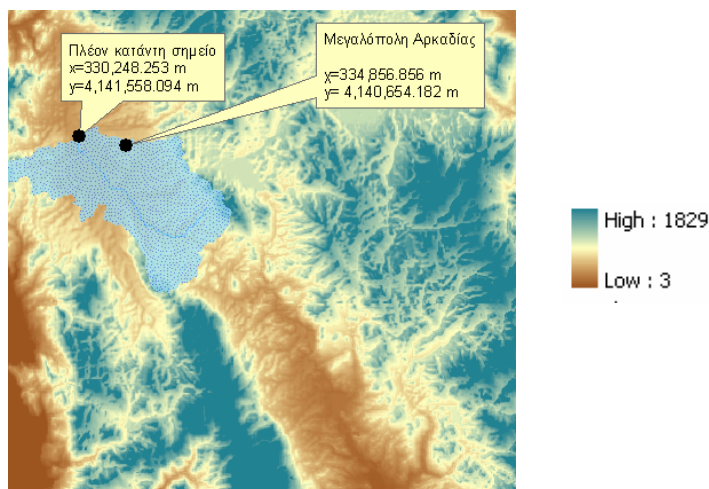
Το Μενού «HMS Project Setup» του της εργαλειοθήκης MainView του HEC-GeoHMS είναι υπεύθυνο να αποσπά τις απαραίτητες πληροφορίες από τη χωρική βάση δεδομένων και να δημιουργεί αρχεία εισόδου για το HEC-HMS. Απαραίτητο για τη διαδικασία αυτή είναι να οριστεί αρχικά η περιοχή μελέτης αν αυτή είναι μικρότερη από αυτή που εξεταζόταν μέχρι τώρα, όπως και στην περίπτωση μας. Η εργασία αυτή εκτελείται ορίζοντας ένα σημείο εξόδου.

Μέσω της εντολής «Start New Project» του HMS Project setup, δίνουμε ένα όνομα στο αρχείο της μελέτης και ορίζουμε τις μήτρες δεδομένων για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το υδρογραφικό δίκτυο, τον κάνναβο συγκεντρωτικής ροής κλπ, με βάση τα αρχεία που δημιουργήθηκαν στα προηγούμενα βήματα (βλ. σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Μήτρα δεδομένων στο HEC-GeoHMS για τον υπολογισμό περιοχής μελέτης

Ως σημείο εξόδου (Project point) επιλέγεται με το εργαλείο  το επιθυμητό σημείο και εν συνεχεία μέσω της εντολής generate project παράγεται η περιοχή μελέτης. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου με γαλάζιο χρώμα φαίνεται η παραχθείσα περιοχή μελέτης, έκτασης περίπου 164 km².



Σχήμα 3.5: Δημιουργία περιοχής μελέτης σε περιβάλλον HEC-GeoHMS

Η επιλογή σημείου έγινε μέσω του Google earth και η μετατροπή συντεταγμένων από το σύστημα αναφοράς WGS84 του Google earth στο σύστημα GR87 των layers της εργασίας έγινε μέσω βιβλιοθήκης γεωδαιτικών μετατροπών συντεταγμένων, η οποία παρέχεται ελεύθερα από το Ε.Μ.Π (<http://www.itia.ntua.gr/%7Eesoulman/icoordstrans/>).

Στο παράθυρο εργασίας **Project View** γίνεται περαιτέρω επεξεργασία της περιοχής μελέτης μέσα από τα Μενού «Basin Processing», «Basin Characteristics» και

«Hydrologic Parameters». Το Μενού «Basin Processing» εκτελεί χρήσιμους υπολογισμούς για τα χαρακτηριστικά της λεκάνης και του υδατορεύματος.

Εξαγωγή τοπογραφικών χαρακτηριστικών «Basin Characteristics»

Στο Μενού «Basin Characteristics» το HEC-GeoHMS υπολογίζει διάφορα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των ρευμάτων και της λεκάνης απορροής. Έτσι, υπολογίζεται το μήκος του ποταμού, η μέση κλίση του, το κέντρο βάρους της κάθε υπολεκάνης απορροής (με τα αντίστοιχα υψόμετρα), το μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής μιας λεκάνης μέχρι την έξοδο της και το μήκος της υδάτινης διαδρομής από το κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδό της (βλ. πίνακα 3.2). Τα στοιχεία αυτά χρησιμεύουν ως δεδομένα εισόδου στη διαμόρφωση των υδρολογικών παραμέτρων του HMS, όπως θα αναλυθεί και στο εδάφιο της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης.

Πίνακας 3.2: Υπολογισμός τοπογραφικών μεγεθών λεκάνης

Μέγεθος	Εκτέλεση υπολογισμού	Τιμή
Εμβαδό λεκάνης απορροής	Περιέχεται στον πίνακα ιδιοτήτων της λεκάνης (open attribute table)	164.02 km ²
Μέγιστο μήκος υδάτινης διαδρομής στη λεκάνη απορροής	Basin characteristics -> Longest flow path	24.31 km
Μήκος υδάτινης διαδρομής (από την προβολή του κέντρου βάρους της λεκάνης στη μέγιστη υδάτινη διαδρομή) μέχρι την έξοδο	Basin characteristics -> Centroidal flow path	9.07 km

3.1.3 Επιλογή προτύπων υπολογισμού υδρολογικών παραμέτρων και δημιουργία αρχείων εισόδου HEC-HMS

Μετά την εξαγωγή των τοπογραφικών χαρακτηριστικών των ρευμάτων και των υπολεκάνων, ο χρήστης ορίζει τα πρότυπα για την εκτέλεση της υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης, ήτοι τα πρότυπα για τον υπολογισμό των απωλειών βροχής, της άμεσης απορροής, της βασικής απορροής και της διόδευση του πλημμυρογραφήματος. Η εργασία εκτελείται μέσω του παραθύρου Select HMS processes του μενού Hydrologic Parameters. Σημειώνεται ότι ο χρήστης μπορεί να

αλλάξει αργότερα τα πρότυπα με αντίστοιχες επιλογές του HEC-HMS, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Για την τελική δημιουργία των αρχείων HMS ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

Πίνακας 3.3: Δημιουργία υποβάθρου HMS από το μενού HMS

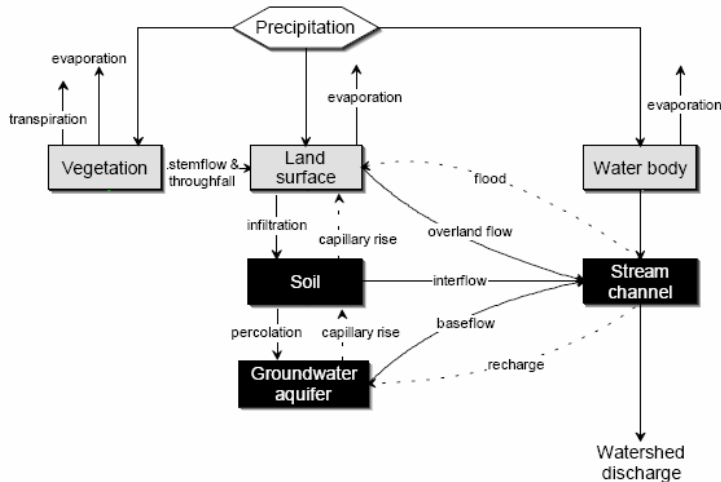
Εντολή	Λειτουργία
Map to HMS unit	Μετατρέπει τα δεδομένα σε μονάδες συμβατές στο HMS
HMS check data	Ελέγχει την ορθότητα των δεδομένων
HMS schematic	Δημιουργεί ένα απλό υδρολογικό δίκτυο και αποτυπώνει τη συνδεσιμότητα των κόμβων (nodes) και των διαύλων (Link)
HMS legend	Αποτυπώνει με εικονίδια στοιχεία κόμβων και διαύλων
Add co-ordinates	Εξαγωγή συντεταγμένων στα στοιχεία κόμβων και διαύλων
Prepare data for model export	Κωδικοποιεί σε πίνακες τα δεδομένα σε μορφή ASCII για να συγκροτηθεί το μοντέλο λεκάνης (basin model)
Background map – Basin File	Εξαγωγή χάρτη αναγνώσιμου σε περιβάλλον HMS
HMS Project setup	Δημιουργία τελικού αρχείου δεδομένων εισόδου για το HMS

3.2 Υδρολογική Απόκριση Λεκάνης

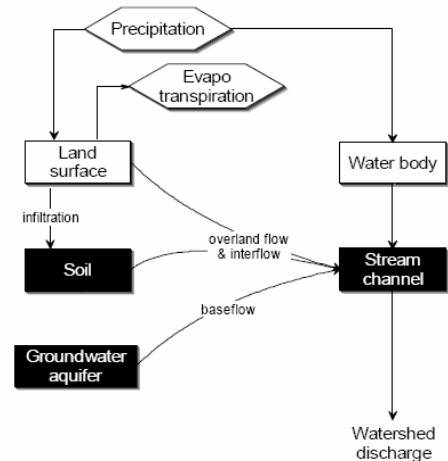
Σκοπός του συγκεκριμένου τμήματος της εργασίας είναι η ανάλυση της υδρολογικής απόκρισης της λεκάνης μελέτης για συγκεκριμένα επεισόδια βροχής. Η επεξεργασία γίνεται σε περιβάλλον HEC-HMS και ακολουθεί τα βήματα, τα οποία παρουσιάστηκαν στο διάγραμμα 3.1.

Το υδρολογικό μοντέλο HEC-HMS ανήκει στα προσδιοριστικά παραμετρικά μοντέλα και βασίζεται στη θεωρία του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος για τη μετατροπή της βροχής σε απορροή. Σχεδιάστηκε από το σώμα μηχανικών του Αμερικανικού στρατού για την προσομοίωση των διαδικασιών βροχής-απορροής σε λεκάνες με δενδροειδή μορφή. Είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε μεγάλες λεκάνες απορροής της υπαίθρου αλλά και σε μικρές αστικές λεκάνες. Τα υδρογραφήματα, που

παράγει, χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των υδατικών συστημάτων, καθώς η χρησιμότητά τους είναι εμφανής σε περιπτώσεις όπως: μελέτες διαθεσιμότητας υδατικών πόρων, αποστραγγιστικά έργα, μελέτες πρόγνωσης πλημμυρών, σχεδιασμό υπερχειλιστών φραγμάτων κ.α. (Feldman 2000). Η αναπαράσταση των διαδικασιών βροχής απορροής απλοποιείται και μοντελοποιείται σε περιβάλλον HEC-HMS ως παρατίθεται στα ακόλουθα διαγράμματα.



Διάγραμμα 3.2: Απεικόνιση διεργασιών βροχής - απορροής (Feldman 2000)



Διάγραμμα 3.3: Μοντελοποίηση απορροής από το HEC-HMS (Feldman 2000)

Από την παράθεση του πραγματικού συστήματος και του αντίστοιχου απλοποιημένου μοντέλου HMS παρατηρείται η λεπτομερής ανάλυση μόνο εκείνων των στοιχείων, που απαιτούνται για την πρόβλεψη της απορροής. Τα υπόλοιπα είτε συγχωνεύονται είτε αμελούνται. Για παράδειγμα το HMS μπορεί να παραλείπει τη λεπτομερή ανάλυση της κίνησης του νερού εντός του εδάφους αλλά και του υδροφορέα, θεωρεί ότι η υπεδάφια και η επιφανειακή ροή μπορούν να θεωρηθούν ως άμεση απορροή και τέλος αγνοεί την εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Οι παράμετροι, που λαμβάνονται υπόψη κάθε φορά, είναι βέβαια απόφαση του μελετητή και εξαρτάται από το είδος της μελέτης.

Το HEC-HMS χωρίζει τον υδρολογικό κύκλο σε επιμέρους συνιστώσες και αντιμετωπίζει την καθεμία ξεχωριστά. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τα μαθηματικά μοντέλα για καθεμία διαδικασία χωριστά και να κάνει τους δικούς του συνδυασμούς ή ακόμη και να κάνει σύγκριση μεταξύ των διάφορων προτύπων. Φυσικά, κάθε μαθηματικό πρότυπο έχει συγκεκριμένους περιορισμούς και δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε περίπτωση, καθώς οι συνθήκες ποικίλουν. Η σωστή επιλογή

επαφίεται στην κρίση του μελετητή και τους στόχους που έχει θέσει για τη μελέτη του, καθώς επίσης και στον αριθμό των διαθέσιμων δεδομένων.

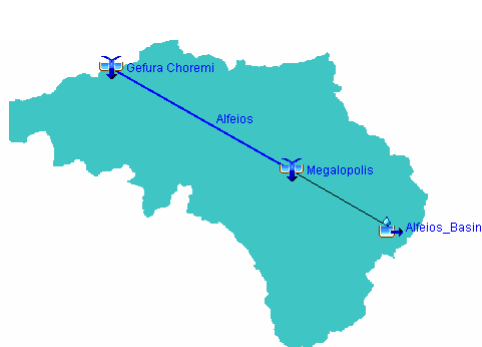
Τα μαθηματικά πρότυπα που διατίθενται στο HEC-HMS - κατ' αντιστοιχία με τις διαδικασίες που περιγράφει - χωρίζονται σε:

1. Πρότυπα υπολογισμού απωλειών βροχής
2. Πρότυπα υπολογισμού άμεσης απορροής
3. Πρότυπα υπολογισμού βασικής απορροής
4. Πρότυπα διόδευσης πλημμυρογραφήματος

3.2.1 Μοντέλο Λεκάνης Απορροής (Basin Model Component)

Μέσω των βημάτων του HEC-GeoHMS, τα οποία παρουσιάστηκαν στον πίνακα 3.3, δημιουργήθηκε ένα αρχείο μοντελοποίησης της λεκάνης απορροής. Το αρχείο εισάγεται στο HEC-HMS με την εντολή `import -> basin model` και στην οθόνη του χρήστη προβάλλεται μια απλοποιημένη δομή της λεκάνης (βλ. σχήμα 3.6) ως ένα σύστημα κόμβων και διαύλων, που συνδέουν διάφορα υδρολογικά στοιχεία (hydrologic elements).

Ο χρήστης μπορεί επίσης να παραθέσει και τους χάρτες υποβάθρου της λεκάνης και του ποταμού για να έχει μια εποπτική εικόνα. Η λειτουργία αυτή γίνεται μέσω της εντολής `view -> background maps`, όπου εκεί φορτώνονται οι δύο χάρτες (σε μορφή `.shp`), που δημιουργήθηκαν από το HEC-GeoHMS.



Σύνδεσμος (junction): Το υδρολογικό αυτό στοιχείο χρησιμεύει για να συνδυάσει τις ροές των υπόλοιπων στοιχείων στα ανάντη.



Υπολεκάνη (Sub-basin)



Τμήμα υδατορέματος

Σχήμα 3.6: Μοντέλο λεκάνης απορροής

Τέλος, η κατάρτιση του μοντέλου λεκάνης προϋποθέτει την επιλογή προτύπων για τον υπολογισμό των απωλειών της βροχής και τον υπολογισμό της άμεσης απορροής. Να σημειωθεί ότι δεν έγινε εφαρμογή προτύπου διόδευσης πλημμύρας και προτύπου υπολογισμού βασικής ροής καθώς αφενός ξεφεύγουν από το στόχο της εργασίας και δεν επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα και αφετέρου δεν υπήρχαν επαρκή δεδομένα για την αξιόπιστη ενσωμάτωσή τους στο υδρολογικό μοντέλο. Ωστόσο, γίνεται μικρή αναφορά των επιλογών που προσφέρονται για την όσο το δυνατόν πληρέστερη αποτύπωση των δυνατοτήτων του μοντέλου HMS.

Ακολουθώντας, παρουσιάζονται τα επιλεγθέντα πρότυπα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

3.2.1.1 Πρότυπο υπολογισμού απωλειών βροχής

Ο τρόπος έκφρασης των απωλειών βροχής στον υδρολογικό κύκλο έχει να κάνει με τη χρονική κλίμακα στην οποία εξετάζονται. Όταν εξετάζεται κλίμακα έτους ή και μεγαλύτερη, οι απώλειες βροχής (διαφορά όγκου κατακρημνισμάτων και όγκου απορροής) οφείλονται στην εξατμισοδιαπνοή των φυτών. Σε μικρότερη όμως κλίμακα, και ειδικά στην περίπτωση ενός μεμονωμένου γεγονότος βροχόπτωσης, οι απώλειες αυτές θεωρούνται αμελητέες σε σύγκριση με τον όγκο απορροής (Ντοανίδης 2007). Στις περιπτώσεις αυτές ως απώλειες λαμβάνεται ο όγκος του νερού που κατακρατείται σε κοιλότητες του εδάφους και ο όγκος που διηθείται.

Τα μαθηματικά πρότυπα, που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της διήθησης είναι εμπειρικά ή ημιεμπειρικά αφού αδυνατούν να κάνουν ακριβή θεώρηση των φυσικών μηχανισμών.

Η μέθοδος της SCS αποτελεί ένα ρεαλιστικό πρότυπο για τον υπολογισμό των απωλειών της βροχόπτωσης. Η ευρεία εφαρμογή του οφείλεται κύρια στην ανάγκη καθορισμού μόνο μιας παραμέτρου - του αριθμού CN, ο οποίος είναι συνάρτηση του τύπου εδάφους, της χρήσης γης και της περατότητας του εδάφους.

Δόμηση προτύπου και εξισώσεις

Καθώς το έδαφος δέχεται τα κατακρημνίσματα για ένα διάστημα t_0 όλη η ποσότητα βροχής κατακρατείται και διηθείται. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε ένα αρχικό έλλειμμα h_0 .

Μετά το πέρας αυτού του χρονικού διαστήματος αρχίζει η ενεργός βροχόπτωση, η οποία συνεπάγεται ποσότητες βροχής, που απορρέουν επιφανειακά

και άλλες που συνεχίζουν να κατακρατούνται μέχρι ενός ορίου, γνωστού ως «δυναμική μέγιστη κατακράτηση S». Το μέγιστο ύψος της ενεργού βροχόπτωσης h_e δεν μπορεί να υπερβεί την ποσότητα της διαφοράς του αρχικού ελλείμματος h_0 από τη συνολική ακαθάριστη βροχόπτωση h .

Η μέθοδος υπολογίζει το ενεργό ύψος βροχής σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Μιμίκου και Μπαλτάς 2003):

$$h_e = \begin{cases} 0 & h \leq 0.2 S \\ \frac{(h - 0.2 S)^2}{h + 0.8 S} & h > 0.2 S \end{cases} \quad (\text{Ε.3.1})$$

Η παραπάνω σχέση επιτρέπει την πλήρη μελέτη της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου, αλλά ο προσδιορισμός της τιμής S απαιτεί την ύπαρξη δεδομένων για την απορροή. Αν αυτά τα δεδομένα δεν υπάρχουν τότε ακολουθείται άλλη ημιεμπειρική μεθοδολογία για την εκτίμηση της παραμέτρου S , μέσω μιας άλλης παραμέτρου, του αριθμού καμπύλης απορροής CN. Οι δύο παράμετροι συνδέονται με την ακόλουθη έκφραση (Μιμίκου και Μπαλτάς 2003).

$$S [\text{mm}] = 254 \left(\frac{100}{\text{CN}} - 1 \right) \quad (\text{Ε.3.2})$$

Η παράμετρος CN παίρνει τιμές από 0 μέχρι 100 και επηρεάζεται από τις συνθήκες εδάφους, τις χρήσεις γης στη λεκάνη απορροής, καθώς και τις πρότερες συνθήκες υγρασίας.

Η SCS έχει δημοσιοποιήσει σε πινακοποιημένη μορφή τιμές του αριθμού καμπύλης απορροής. Επίσης, αντίστοιχοι πίνακες έχουν δημοσιευτεί για τα ελληνικά δεδομένα και παρατίθενται ακολούθως.

Πίνακας 3.4: Τύποι προηγηθεισών συνθηκών υγρασίας κατά SCS (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999)

- Τύπος I: Ξηρές συνθήκες (εδάφη ξηρά, αλλά πάνω από το σημείο μαρασμού*). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μικρότερη από 13 mm (ή 35 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- Τύπος II: Μέσες συνθήκες. Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεταξύ 13 και 38 mm (ή μεταξύ 35 και 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).
- Τύπος III: Υγρές συνθήκες (εδάφη σχεδόν κορεσμένα). Αντιστοιχούν στην περίπτωση που η βροχόπτωση των προηγούμενων 5 ημερών είναι μεγαλύτερη από 38 mm (ή μεγαλύτερη από 53 mm για περιοχή με φυτοκάλυψη σε συνθήκες ανάπτυξης).

Πίνακας 3.5: Τύποι εδαφών κατά SCS ανάλογα με τη διαπερατότητά τους (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999)

- Ομάδα Α: Εδάφη με μεγάλους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμιώδη και χαλικώδη με πολύ μικρό ποσοστό ιλύος και αργίλου.
- Ομάδα Β: Εδάφη με μέσους ρυθμούς διήθησης, π.χ. αμιώδης πηλός.
- Ομάδα C: Εδάφη με μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη από αργιλοπηλό, εδάφη με σημαντικό ποσοστό αργίλου, εδάφη φτωχά σε οργανικό υλικό.
- Ομάδα D: Εδάφη με πολύ μικρούς ρυθμούς διήθησης, π.χ. εδάφη που διογκώνονται σημαντικά όταν διαβραχούν, πλαστικές άργιλοι. Στην ίδια ομάδα περιλαμβάνονται εδάφη μικρού βάθους με σχεδόν αδιαπέρατους υπο-ορίζοντες κοντά στην επιφάνεια.

Πίνακας 3.6: Τυπικοί αριθμοί καμπύλης απορροής (CN) κατά SCS για προηγηθείσες συνθήκες υγρασίας τύπου II (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος 1999)

Περιγραφή χρήσης γης	Υδρολογικός τύπος εδάφους			
	A	B	C	D
Καλλιεργημένες εκτάσεις	62 - 72	71 - 81	78 - 88	81 - 91
Λιβάδια, βοσκοτόποι	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%	49	69	79	84
Εμπορικές περιοχές	89	92	94	95
Βιομηχανικές περιοχές (72% αδιαπέρατες)	81	88	91	93
Οικιστικές περιοχές				
Μέσο μέγεθος Ποσοστό αδιαπέρα- οικοπέδου (στρ) της επιφάνειας (%)				
≤ 0.5	65	77	85	90
1	38	61	75	83
1.5	30	57	72	81
2	25	54	70	80
4	20	51	68	79
Δρόμοι				
με οδόστρωμα και δίκτυο ομβρίων	98	98	98	98
χαλικόστρωτοι	76	85	89	91
χωματόδρομοι	72	82	87	89

Επειδή όμως κάθε λεκάνη δεν απαρτίζεται από μία μόνο χρήση γης και τύπο εδάφους, υπολογίζεται ο σταθμισμένος μέσος αριθμός καμπύλης απορροής από την εξής σχέση:

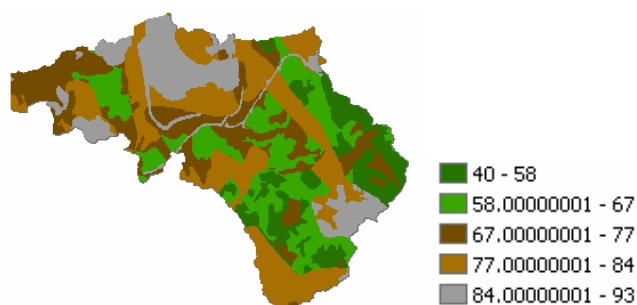
$$CN_{\text{μέσο}} = \frac{\sum A_i CN_i}{\sum A_i} \quad (\text{E.3.3})$$

Ο αριθμός καμπύλης απορροής παίρνει τιμές από 35 (εδάφη με τη μεγαλύτερη διήθηση) μέχρι 98 (αδιαπέρατες επιφάνειες).

Η διαδικασία για τον υπολογισμό του αριθμού CN για κάθε υπολεκάνη βασίζεται στη χρήση συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας και συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα.

- Εισαγωγή του χάρτη με τα όρια των υπολεκανών απορροής, για τις οποίες θα υπολογιστεί ο αριθμός CN
- Εισαγωγή χαρτών με υδρολιθολογικούς τύπους εδαφών και χρήσεις γης
- Επικάλυψη των 2 χαρτών για την εξαγωγή ενός συγχωνευμένου χάρτη, που περιέχει τα χαρακτηριστικά και των 2 (εντολή intersect στην εργαλειοθήκη arctoolbox του arcmap)
- Δημιουργία πίνακα αναφοράς με τις τιμές CN για συνδυασμούς εδαφών και χρήσεων (προετοιμασία σε excel και εισαγωγή σε arcmap)
- Δημιουργία GRID με τον αριθμό CN για κάθε κελί (από το μενού utility του project view του HEC-GeoHMS – εντολή Generate CN grid)
- Υπολογισμός μέσου όρου CN για κάθε υπολεκάνη με την εισαγωγή του μαθηματικού τύπου για τον σταθμισμένο μέσο όρο (από το μενού spatial analyst του ArcMap – εντολή Map Algebra).

Στο σχήμα 3.7 παρατίθεται ο τελικός κάρναβος με τις τιμές CN για όλη τη λεκάνη, ενώ στο παράρτημα της εργασίας παρουσιάζονται τα ενδιάμεσα προϊόντα με την «τομή» των χαρτών χρήσης γης και τύπων εδάφους και την κατάρτιση πινάκων τιμών CN για τους επιμέρους συνδυασμούς. Ο μέσος αριθμός καμπύλης απορροής για όλη τη λεκάνη προέκυψε ίσος με $74.09 \approx 74$ και η αδιαπέρατη ζώνη ίση με $3.93 \% \approx 4\%$ της όλης επιφάνειας.



Σχήμα 3.7: Κάρναβος υπολογισμού αριθμού CN

Ο χρήστης λοιπόν μεταβαίνει στο παράθυρο εργασίας (βλ. σχήμα 3.8) και τοποθετεί τον αριθμό CN της λεκάνης. Στο πεδίο initial abstraction χρήστης θέτει τιμή

για το αρχικό έλλειμμα. Αν αυτό αγνοηθεί τότε το πρόγραμμα θεωρεί ότι το αρχικό έλλειμμα ισούται με το 20% της δυναμικής μέγιστης κατακράτησης, κάτι στο οποίο βασίζεται άλλωστε και η κύρια σχέση για τον υπολογισμό του ενεργού ύψους βροχής.

Basin Name: Basinmodel	
Element Name: Alfeios_Basin	
Initial Abstraction (MM)	<input type="text"/>
Curve Number:	74
Impervious (%)	4

Σχήμα 3.8: Παράθυρο εκτέλεσης υπολογισμού απωλειών

3.2.1.2 Πρότυπο υπολογισμού βασικής ροής

Το σχήμα ενός υδρογραφήματος που προκαλείται από μια βροχή με σχετικά μικρή διάρκεια και καλύπτει όλη την υδρολογική λεκάνη έχει κατά κανόνα μία πρότυπη μορφή. Η μορφή αυτή είναι κωδωνοειδούς σχήματος (Μιμίκου και Μπαλτάς 2003) εμφανίζει στην αρχή έναν ανοδικό κλάδο, που σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια του η παροχή του υδατορεύματος συνεχώς αυξάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή και κατόπιν ακολουθεί ένας καθοδικός κλάδος όπου η παροχή μειώνεται συνεχώς και μπορεί να φτάσει και στο μηδέν, εξαρτώμενη από την ύπαρξη ή όχι βασικής ροής. Η μέγιστη αιχμή, που προκαλείται από μια βροχή δεδομένης διάρκειας και εντάσεως, εμφανίζεται όταν όλα τα τμήματα της υδρολογικής λεκάνης συνεισφέρουν νερό, όταν δηλαδή το μέρος της λεκάνης που βρίσκεται πιο κοντά στην έξοδο της εξακολουθεί να συνεισφέρει νερό όταν και το νερό από το πιο απομακρυσμένο σημείο της έχει φθάσει στην έξοδο.

Το HEC-HMS χρησιμοποιεί διάφορα πρότυπα για τον υπολογισμό της βασικής ροής, με το πιο δημοφιλές να είναι αυτό της εκθετικής μείωσης. Στην παρούσα εργασία, λόγω της έλλειψης δεδομένων για την προσομοίωση της βασικής ροής αλλά και λόγω της μικρής επιρροής στον τελικό στόχο της εργασίας αποφασίσθηκε η μη ενσωμάτωση της βασικής ροής στο υδρολογικό μοντέλο.

3.2.1.3 Πρότυπο υπολογισμού άμεσης απορροής

Η άμεση απορροή είναι φυσική συνέπεια της ενεργού βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η ενεργός βροχόπτωση είναι ίση με τη συνολική βροχόπτωση μείον τις απώλειες. Έτσι καθορίζεται ο συνολικός όγκος της άμεσης

απορροής, όχι όμως και η χρονική κατανομή του. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν διάφορα μαθηματικά πρότυπα τα οποία πιο συγκεκριμένα προσδιορίζουν το χρόνο και την τιμή της παροχής αιχμής, τη διάρκεια της άμεσης απορροής και το χρόνο υστέρησης της άμεσης απορροής, που ορίζεται ως η χρονική διαφορά ανάμεσα στο κέντρο βάρους της ενεργού βροχόπτωσης και της παροχής αιχμής.

Η ανάπτυξη αυτών των μοντέλων ακολούθησε δύο διαφορετικούς δρόμους. Από τη μία αναπτύχθηκαν τα μοντέλα φυσικής βάσης όπως το πρότυπο του κινηματικού κύματος, τα οποία στηρίζονται στις θεμελιώδεις εξισώσεις της υδραυλικής και από την άλλη αναπτύχθηκαν τα μοντέλα που στηρίζονται στη θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος (Ντοανίδης 2007). Τα πρώτα απαιτούν τη γνώση πολλών παραμέτρων, υδραυλικών και γεωλογικών χαρακτηριστικών της λεκάνης απορροής, και για το λόγο αυτό είναι δύσχρηστα αφού συνήθως δεν υπάρχουν όλα τα απαραίτητα δεδομένα. Τα δεύτερα παρότι εμπεριέχουν απλουστευτικές παραδοχές και περιορισμούς, παρέχουν αρκετά καλές προσεγγίσεις και είναι πιο εύκολα στην εφαρμογή τους.

Βασικές αρχές του Μοναδιαίου Υδρογραφήματος

Το μοναδιαίο υδρογράφημα είναι το υδρογράφημα που προκαλείται από ενεργό βροχή ύψους 10mm, ομοιόμορφα κατανεμημένη σε όλη την έκταση της λεκάνης και έχει σταθερή ένταση.

Βασικές αρχές του μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι η αρχή της αναλογίας και η αρχή τα επαλληλίας. Σύμφωνα με την πρώτη, δύο ενεργές βροχές ίσης διάρκειας αλλά διαφορετικών εντάσεων, προκαλούν πλημμυρογραφήματα που έχουν την ίδια χρονική βάση και σε κάθε χρονική στιγμή ο λόγος των παροχών τους είναι ίσος με το λόγο των εντάσεών τους. Η αρχή αυτή είναι άμεσα συνυφασμένη με τη γραμμικότητα της λεκάνης απορροής. Σύμφωνα με τη δεύτερη, το υδρογράφημα που προκαλείται από επιμέρους βροχές έχει τεταγμένες (παροχές) ίσες με το άθροισμα των τεταγμένων των επιμέρους υδρογραφημάτων για κάθε χρονική στιγμή.

Εκτός από αυτές τις βασικές αρχές (Μιμίκου και Μπαλτάς 2003), η θεωρία του μοναδιαίου υδρογραφήματος στηρίζεται στις εξής παραδοχές:

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

2. Σε μια δεδομένη υδρολογική λεκάνη, η άμεση απορροή που προκαλείται από μια βροχή είναι ανεξάρτητη από τις προηγούμενες βροχοπτώσεις ή τις επόμενες.
3. Η κατάσταση της λεκάνης απορροής παραμένει αμετάβλητη σε σχέση με το χρόνο.

Τα συνθετικά μοναδιαία υδρογραφήματα χρησιμοποιούνται στις θέσεις που δεν υπάρχουν μετρήσεις. Οι μέθοδοι αυτές είναι εμπειρικές και μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στον προσδιορισμό των παραμέτρων που αφορούν τον υπολογισμό της αιχμής και του χρόνου υστέρησης. Η πιο γνωστή μέθοδος κατασκευής συνθετικού μοναδιαίου υδρογραφήματος είναι η μέθοδος Snyder..

Το συνθετικό μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder βασίζεται στις ακόλουθες σχέσεις:

$$t_l = 5,5t_r \quad (\text{E.3.4})$$

Όπου t_l ο χρόνος υστέρησης και t_r η διάρκεια της ενεργού βροχόπτωσης. Ο χρόνος υστέρησης υπολογίζεται από τα μορφολογικά στοιχεία της λεκάνης αλλά και από τα στοιχεία υδρολογίας της περιοχής, με βάση τη σχέση:

$$t_l = C_1 C_t (LL_c)^{0,3} \quad (\text{E.3.5})$$

$$q_p = \frac{C_2 C_p A}{t_l} \quad (\text{E.3.6})$$

$$T_{base} = 3 + \frac{t_l}{8} \quad (\text{E.3.7})$$

Όπου:

C_1 : συντελεστής που παίρνει την τιμή 0,75 για το μετρικό σύστημα (για μετατροπή μονάδων)

C_t : συντελεστής που αντιπροσωπεύει τα τοπογραφικά και εδαφολογικά χαρακτηριστικά της λεκάνης και παίρνει τιμές από 1,80 έως 2,20 με μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν σε λεκάνες με μικρές κλίσεις

L : το μήκος του κυρίου υδατορεύματος από το πιο απομακρυσμένο σημείο της λεκάνης μέχρι την έξοδο σε km

L_c : το μήκος του κυρίου υδατορεύματος από το πλησιέστερο σημείο στο κέντρο βάρους της λεκάνης μέχρι την έξοδο σε km

q_p : παροχή αιχμής σε m^3/sec

C_2 : συντελεστής που παίρνει την τιμή 2,75 στο μετρικό σύστημα

C_p : συντελεστής που αντιπροσωπεύει τις συνθήκες μεταφοράς του πλημμυρικού κύματος και της αποθήκευσης της λεκάνης και κυμαίνεται από 0,4 έως 0,8 , με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν σε λεκάνες με μεγάλες κλίσεις.

A: το εμβαδόν της λεκάνης απορροής σε km^2

T_{base} : η χρονική βάση του υδρογραφήματος σε ημέρες

Αν το ζητούμενο συνθετικό ΜΥ έχει διάρκεια $T_r' > t_r$ τότε ο χρόνος υστέρησης διορθώνεται με τη σχέση:

$$T_1' = t_r + 0,25(T_r' - t_r) \quad (E.3.8)$$

Η διορθωμένη τιμή του χρόνου υστέρησης πρέπει να αντικατασταθεί στις προηγούμενες εξισώσεις για να υπολογιστούν οι διορθωμένες τιμές της παροχής αιχμής και του χρόνου βάσης του υδρογραφήματος. Με τις διορθωμένες τιμές μπορούν πλέον να υπολογιστούν τα πλάτη W_{50} και W_{75} με τις ακόλουθες εξισώσεις:

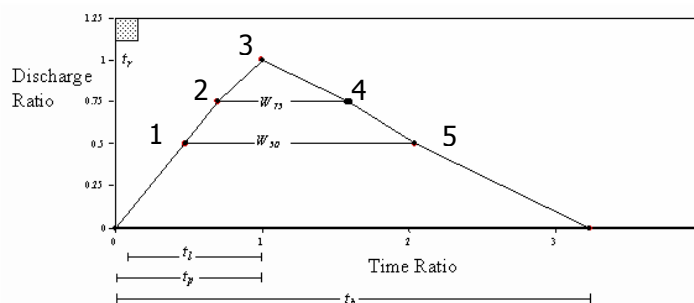
$$W_{50} = 2,143 (q_p' / A)^{-1,08} \quad (E.3.9)$$

$$W_{75} = 1,225 (q_p' / A)^{-1,08} \quad (E.3.10)$$

Από την εφαρμογή της ως άνω μεθοδολογίας προκύπτουν τέσσερα σημεία του συνθετικού υδρογραφήματος (βλ. σχήμα 3.9) με τις συντεταγμένες του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.7: Συντεταγμένες σημείων υδρογραφήματος Snyder

Σημείο	X	Y
1.	$T_1 - W_{50}/3$	$0.5 Q_p$
2.	$T_1 - W_{75}/3$	$0.75 Q_p$
3.	T_1	Q_p
4.	$T_1 + (2 * W_{75}/3)$	$0.75 Q_p$
5.	$T_1 + (2 * W_{50}/3)$	$0.5 Q_p$



Σχήμα 3.9: Το μοναδιαίο υδρογράφημα του Snyder [(Ramirez 2000 - μετά από επεξεργασία)]

Σε περιβάλλον HEC-HMS, ο χρήστης καλείται να δώσει τιμές δύο παραμέτρων, οι οποίες είναι ο χρόνος υστέρησης t_i και ο συντελεστής C_p . Ο χρόνος υστέρησης για κάθε υπολεκάνη υπολογίζεται μέσω της ήδη αναφερθείσας σχέσης (Ε.3.5):

$$t_i = C_1 C_T (LL_c)^{0,3}$$

Τα δεδομένα για τον υπολογισμό του χρόνου υστέρησης της λεκάνης παρουσιάζονται ακολούθως:

Πίνακας 3.8: Υπολογισμός χρόνου υστέρησης για τη λεκάνη

Λεκάνη	C_1	C_T	L (km)	L_c (km)	Χρόνος υστέρησης t_i (h)
Alfeios Basin	0,75	2,1	24,31	9,07	7,95

Σε ότι αφορά το συντελεστή C_p (Peaking coefficient) δεν υπάρχει κάποια συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού και προσδιορίζεται εν γένει μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης. Οι Bedient and Huber (1992) αναφέρουν ότι ο συντελεστής κυμαίνεται από 0.4 έως 0.8 με μικρές τιμές C_p να σχετίζονται με μεγάλες τιμές C_T .

Πίνακας 3.9: Συντελεστής C_p

Λεκάνη	Συντελεστής C_p
Alfeios Basin	0.7

3.2.1.4 Πρότυπο διόδευσης πλημμύρας

Για τη διόδευση πλημμυρογραφήματος, η μελέτη της οποίας ξεφεύγει από το στόχο της εργασίας και δεν γίνεται επέκταση, ο μελετητής καλείται να επιλέξει από μια σειρά προτύπων, όπως το πρότυπο Muksingum – Cunge και το πρότυπο Lag.

3.2.2 Μετεωρολογικό Μοντέλο (Meteorologic Model Component)

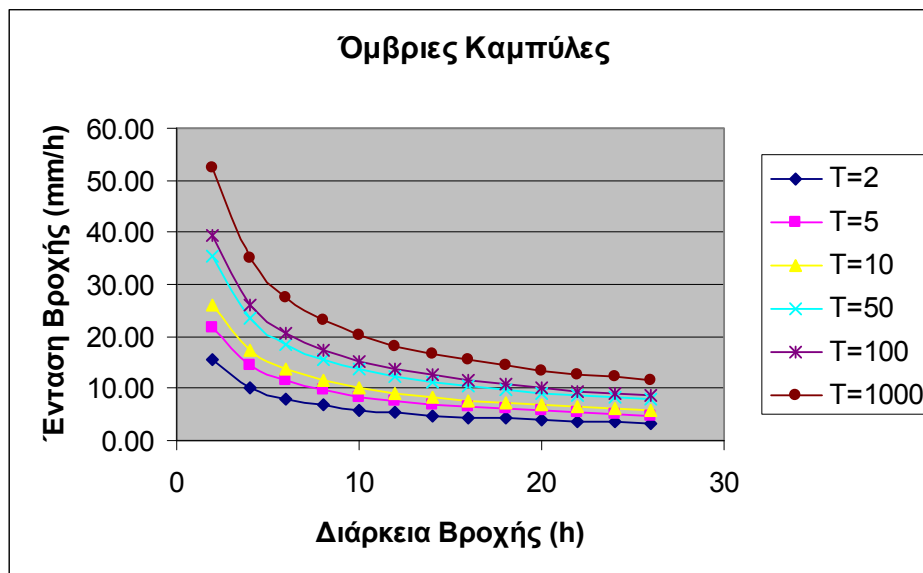
Η κατάρτιση του μετεωρολογικού μοντέλου αφορά στην εισαγωγή των στοιχείων της μετεωρολογικής πληροφορίας, που ενσωματώνει τις απαραίτητες οριακές συνθήκες για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Η μετεωρολογική αυτή πληροφορία εισάγεται είτε μέσω παρατηρημένων βροχογραφήματων είτε μέσω καθορισμού υποθετικών επεισοδίων βροχής με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς. Στην ιδανική περίπτωση διεξάγεται υδρολογική μελέτη στην περιοχή, καταρτίζονται όμβριες καμπύλες και εκτελείται υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης με ρύθμιση (calibration) με βάση τα παρατηρημένα βροχογραφήματα.

Στην παρούσα εργασία, απουσία δεδομένων βροχομετρίας, αποφασίσθηκε η επιλογή της μεθόδου του καθορισμένου υετογραφήματος (user-specified hyetograph).

Ως αρχικό στοιχείο για την ανάλυση θα πρέπει να ληφθεί μια όμβρια καμπύλη για την περιοχή. Με λογικές παραδοχές και συσχετίσεις επελέγη η ακόλουθη όμβρια καμπύλη για την Ανατολική Στερεά Ελλάδα (Κοζώνης 1995) με τιμή συντελεστή $\kappa=20$. Η οικογένεια των ομβρίων καμπύλων παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.4.

$$i = \kappa \frac{1 - \frac{\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}))}{2.34}}{d^{0.59}}$$

(E.3.11)



Διάγραμμα 3.4: Όμβριες καμπύλες για διάφορες περιόδους επαναφοράς

Η αξιοποίηση της όμβριας καμπύλης οδηγεί στην κατάρτιση υετογραφήματος σχεδιασμού με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων τμηματικών υψών, όπως αναλύεται ακολούθως.

Η μέθοδος των εναλλασσόμενων τμηματικών υψών

Για υποτιθέμενο επεισόδιο βροχής διάρκειας 24h και για κάθε περίοδο επαναφοράς υπολογίζονται οι εντάσεις και τα ύψη βροχής σε κάθε ώρα με αξιοποίηση της εξίσωσης E.3.11 της όμβριας καμπύλης. Εν συνεχεία γίνεται επιφανειακή

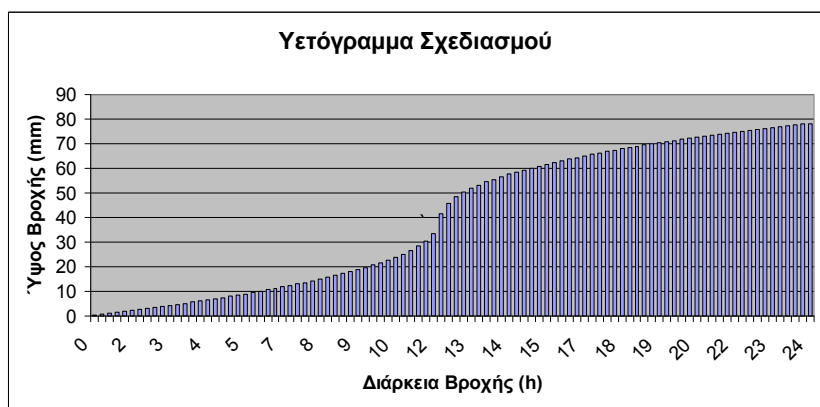
αναγωγή του σημειακού ύψους βροχής με υπολογισμό συντελεστή επιφανειακής αναγωγής ϕ από τη σχέση:

$$\phi = 1 - \frac{0.048 * A^{0.36 - 0.01 * \ln A}}{d^{0.35}} \quad (E.3.12)$$

Αφού πολλαπλασιαστεί το σημειακό ύψος βροχής h με τον αντίστοιχο συντελεστή λαμβάνουμε το επιφανειακό ύψος βροχής. Επειδή η κάθε τιμή ύψους βροχής περιέχει και την προηγούμενη γίνεται τμηματικός υπολογισμός για κάθε ώρα και στη συνέχεια τα τμηματικά ύψη βροχής ανακατατάσσονται, ούτως ώστε η μεγαλύτερη τιμή να τοποθετείται στη μέση του επεισοδίου, η αμέσως επόμενη μεγαλύτερη μια ώρα μετά, η αμέσως επόμενη μια ώρα πριν κ.ο.κ. Το τελικό βήμα αφορά στον υπολογισμό του αθροιστικού ύψους βροχής. Ακολουθώς παρουσιάζεται η διαδικασία των παραπάνω βημάτων και τα αποτελέσματα για περίοδο επαναφοράς $T=50$ έτη για ολόκληρη τη λεκάνη συνολικού εμβαδού $A=164.020 \text{ km}^2$.

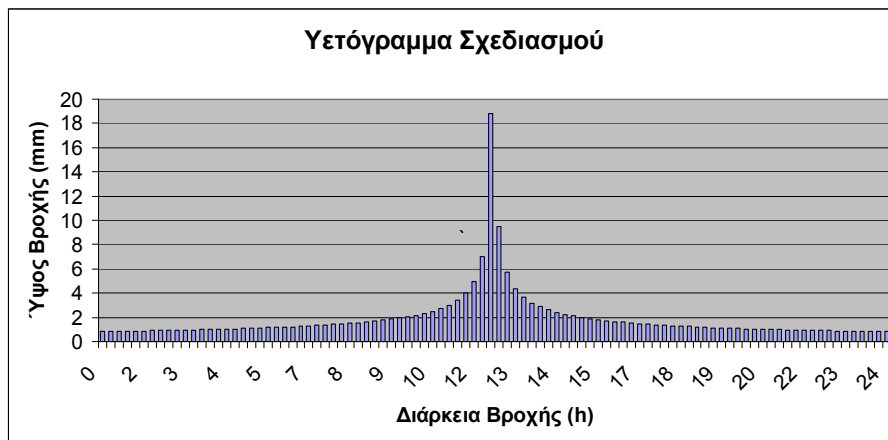
Πίνακας 3.10: Βήματα υπολογισμού υετογραφήματος σχεδιασμού βροχής 24 h για περίοδο επαναφοράς 50 ετών

d (h)	T (έτη)	I (mm/h)	h (mm)	ϕ	$h * \phi$	Τμηματικό ύψος	Εναλλαγή	Αθροιστικό ύψος
0.25	50	120.878	30.220	0.623	18.826	18.826	0.837	0.837
0.50	50	80.305	40.152	0.704	28.275	9.449	0.847	1.684
0.75	50	63.219	47.414	0.743	35.244	6.969	0.858	2.543
1.00	50	53.350	53.350	0.768	40.968	5.724	0.870	3.412
23.00	50	8.389	192.949	0.923	178.004	0.853	0.864	177.601
23.25	50	8.336	193.806	0.923	178.852	0.847	0.853	178.443
23.50	50	8.283	194.658	0.923	179.694	0.842	0.842	179.275
23.75	50	8.232	195.504	0.923	180.531	0.837	0.832	180.112
24.00	50	8.181	196.345	0.924	181.362	0.832	0.837	180.112



Διάγραμμα 3.5: Υετογράφημα σχεδιασμού βροχής 24 h για περίοδο επαναφοράς 50 ετών – αθροιστικά ύψη ανά δεκαπεντάλεπτο⁴

⁴ Το υετογράφημα αυτό αναφέρεται στο αθροιστικό σύνολο της βροχόπτωσης χωρίς να έχουν υπολογιστεί οι απώλειες.



Διάγραμμα 3.6: Υετογράφημα σχεδιασμού βροχής 24 h για περίοδο επαναφοράς 50 ετών – τμηματικά ύψη ανά δεκαπεντάλεπτο

Ο μελετητής καλείται λοιπόν, αφού καταρτίσει τα υετογραφήματα σχεδιασμού της λεκάνης, να ενσωματώσει τα δεδομένα στο HEC-HMS. Η διαδικασία συνοψίζεται στα βήματα του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.11: Εισαγωγή δεδομένων στο HEC-HMS

Εντολή	Παρατηρήσεις
Components-> Meteorologic model manager	Δημιουργία νέου μετεωρολογικού αρχείου που θα δεχθεί τα δεδομένα. Στη φάση αυτή ο χρήστης καθορίζει και τον τύπο των δεδομένων (πχ αθροιστικό υετογράφημα)
Components-> Time series data manager	Δημιουργία αρχείου που θα δεχθεί δεδομένα σε μορφή χρονοσειράς (αν το δεδομένο εισόδου είναι ένα υετογράφημα)
Time window	Καθορισμός επεισοδίου βροχόπτωσης (πχ 24 h με βήμα 15 mins)
Time series gage	Εισαγωγή δεδομένων χρονοσειράς είτε χειροκίνητα είτε μέσω αρχείου .dss που έχει δημιουργηθεί σε άλλο πρόγραμμα (π.χ Excel)

Σε περίπτωση όπου η μελέτη γίνεται για ένα μικρό επεισόδιο βροχόπτωσης, ο χρήστης μπορεί να εισάγει χειροκίνητα της τιμές του υετογραφήματος σε πίνακες που προσφέρει το πρόγραμμα. Ωστόσο, στην περίπτωση που απαιτείται ανάλυση σε χρονικό βήμα πχ 15 λεπτών για ένα 24-ώρο επεισόδιο βροχόπτωσης η διαδικασία

είναι χρονοβόρα και καλό είναι να γίνει επεξεργασία σε φύλλο δεδομένων του Excel και μετά εισαγωγή των δεδομένων στο HMS μέσω ενδιάμεσης επεξεργασίας σε λογισμικό HEC-DSSVue⁵.

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη για 24-ωρο επεισόδιο βροχόπτωσης με χρονικό βήμα 15 λεπτών. Η ανάλυση αντιστοιχεί σε διαφορετικά υετογραφήματα σχεδιασμού για περιόδους επαναφοράς 2,10,20,50,100,1000 ετών.

3.2.3 Αρχείο Προσομοιώσεων (Control Specifications Component)

Στην τελευταία φάση πριν την εκτέλεση των υπολογισμών, το HEC-HMS ζητά από το χρήστη να δημιουργήσει ένα αρχείο προσομοίωσης, στο οποίο καθορίζεται η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης (εδώ επελέγη διάρκεια 4 ημερών) καθώς και τα δεδομένα εισόδου, που δημιουργήθηκαν σε προηγούμενα βήματα. Η ενεργοποίηση της εντολής γίνεται μέσω του μενού component->control specifications manager.

Control Specifications	
Name:	Simulation_Alfeios
Description:	Alfeios river basin simulation
Start Date (ddMMYY):	05Σεπ2010
Start Time (HH:mm):	10:00
End Date (ddMMYY):	09Σεπ2010
End Time (HH:mm):	10:00
Time Interval:	15 Minutes

Σχήμα 3.10: Δημιουργία αρχείου προσομοίωσης

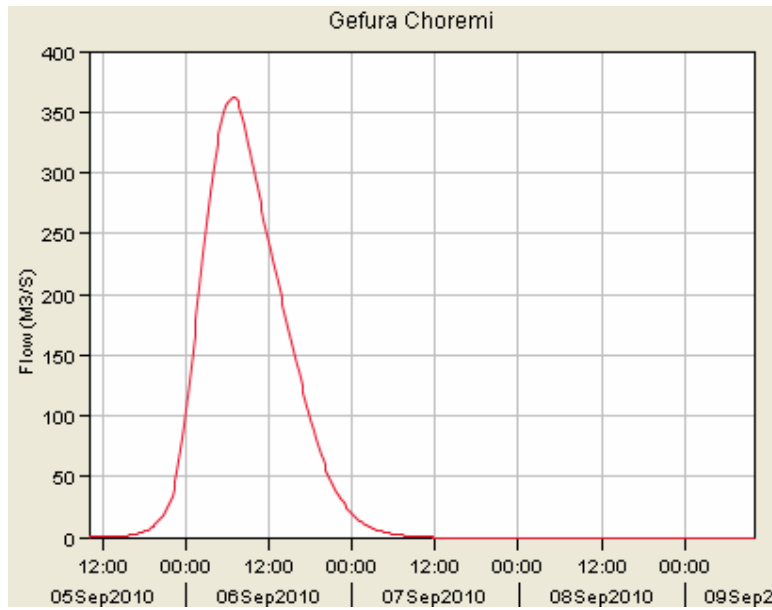
3.2.4 Αρχείο Αποτελεσμάτων

Έχοντας πλέον δημιουργήσει το σύνολο των δεδομένων εισόδου το πρόγραμμα εκτελεί τους υπολογισμούς μέσω της εντολής compute run. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι υδρογραφήματα της λεκάνης, διαγράμματα και πίνακες βροχόπτωσης, απωλειών, άμεσης απορροής κλπ.

Ενδεικτικά παρατίθεται το υδρογράφημα της λεκάνης απορροής για περίοδο επαναφοράς 50 ετών. Όλα τα αποτελέσματα της υδραυλικής προσομοίωσης της

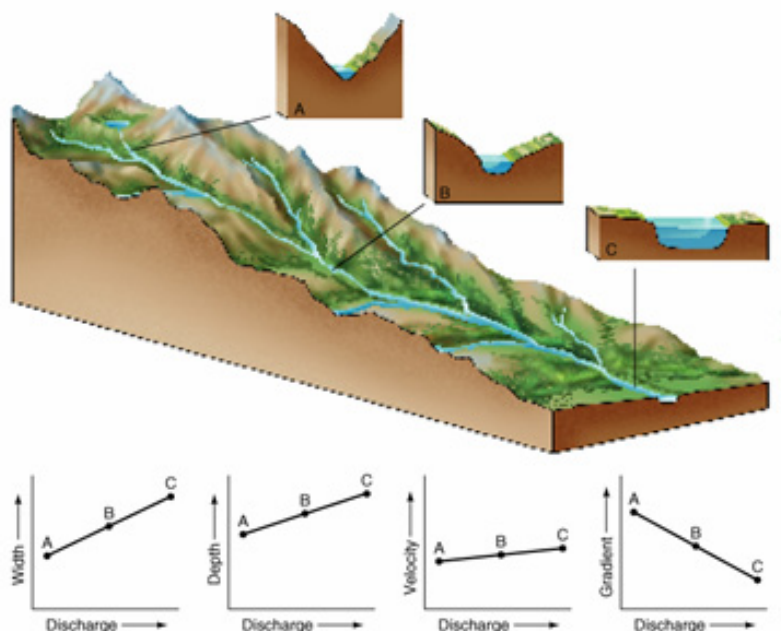
⁵ Τα αρχεία που εισάγονται στο HMS πρέπει να ναι σε format .dss, κάτι το οποίο γίνεται αφού πρώτα διαμορφωθούν κατάλληλα πεδία στο excel και μέσω ειδικής εφαρμογής μετατραπούν στο συμβατό format. Για περισσότερες πληροφορίες για τη μετατροπή ο αναγνώστης παραπέμπεται στην ιστοσελίδα <http://www.hec.usace.army.mil/>

λεκάνης της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5 των αποτελεσμάτων.



Διάγραμμα 3.7: Υδρογράφημα Λεκάνης για επεισόδιο βροχής 24 h περιόδου επαναφοράς 50 ετών

Κεφάλαιο 4 Υδραυλική Προσομοίωση Αλφειού Ποταμού



Περίληψη

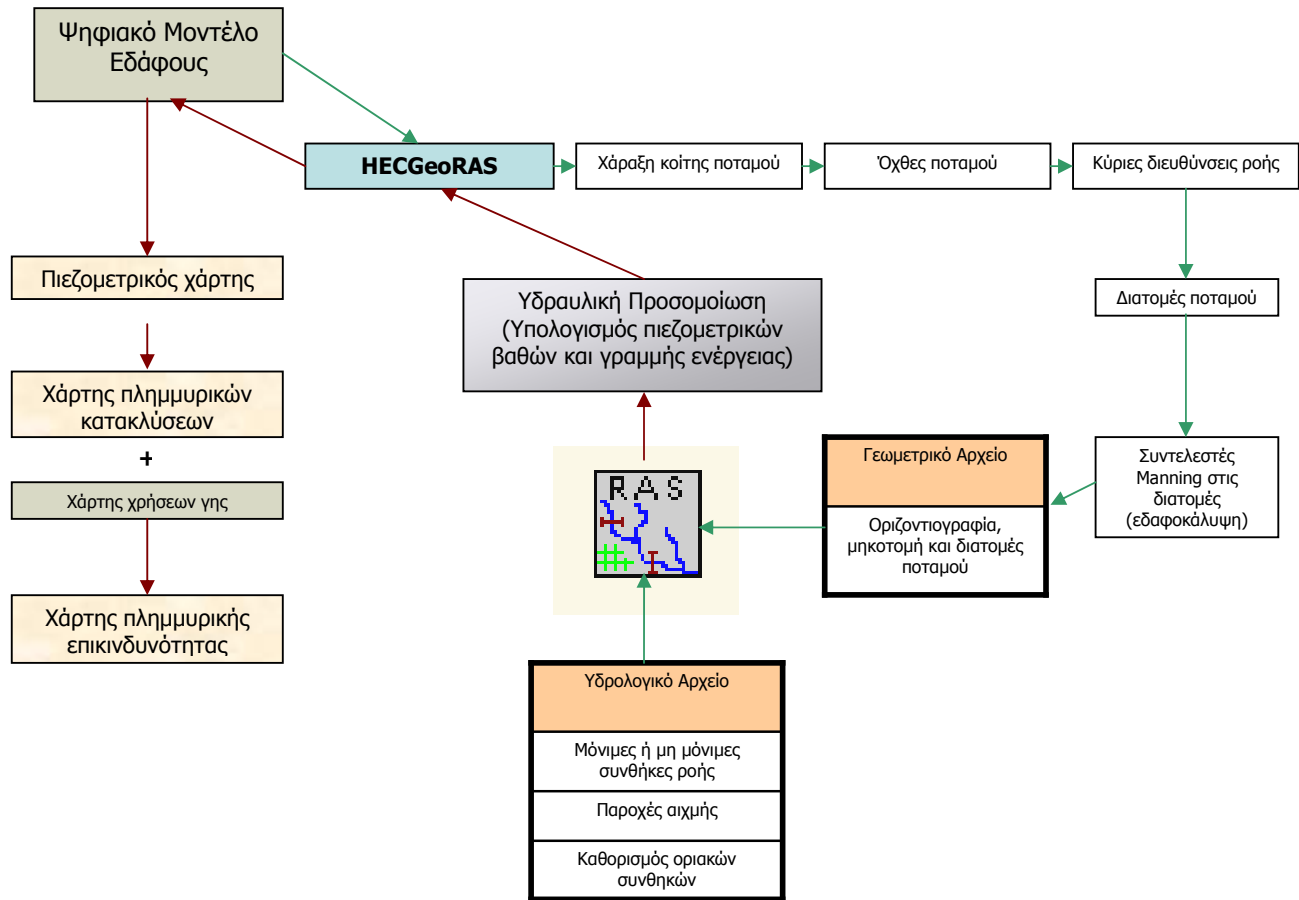
Στο κεφάλαιο αυτό δίδεται βήμα προς βήμα η σύνθεση της μεθοδολογίας για την υδραυλική προσομοίωση τμήματος 20 περίπου km του ποταμού Αλφειού σε έξι περιόδους επαναφοράς. Η ανάλυση γίνεται στο περιβάλλον των λογισμικών HEC-GeoRAS και HEC-RAS και έχει ως τελικό εξαγόμενο τον υπολογισμό των πιεζομετρικών βαθών σε όλο το εύρος της κοίτης του ποταμού. Τα βάθη αυτά αξιοποιούνται για την κατάρτιση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης.

Θεματικοί Άξονες Κεφαλαίου

- Γεωμετρική χάραξη κοίτης ποταμού
- Δόμηση μοντέλου υδραυλικής προσομοίωσης
- Χαρτογράφηση πλημμυρικού πεδίου

4 Υδραυλική Προσομοίωση Αλφειού Ποταμού

Στο ακόλουθο εποπτικό διάγραμμα δίνεται η αλληλουχία των λειτουργιών των προγραμμάτων HEC-RAS και HEC-GeoRAS για την παραγωγή χαρτών πλημμυρικής κατάκλισης.



Διάγραμμα 4.1: Διαδικασία εκτέλεσης υδραυλικής προσομοίωσης μέσω HEC-RAS

4.1 Δημιουργία Αρχείου Γεωμετρικών Δεδομένων

Η δημιουργία του γεωμετρικού αρχείου πραγματοποιείται μέσω της επέκτασης HEC-GeoRAS του ArcMap. Τα βήματα που συνθέτουν τη διαδικασία συνοψίζονται ως εξής:

- Παραγωγή ισοϋψών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους
- Δημιουργία θεματικών επιπέδων
 - Κύρια γραμμή ροής (υποχρεωτικό)

- Όχθες (προαιρετικό)
- Κύριες διευθύνσεις ροής (προαιρετικό)
- Διατομές (υποχρεωτικό)
- Κατασκευές (προαιρετικό)
- Περιοχές ανενεργού ροής (προαιρετικό)
- Χρήσεις γης (προαιρετικό)
- Αναχώματα (προαιρετικό)
- Περιοχές αποθήκευσης νερού (προαιρετικό)
- Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή γεωμετρικού αρχείου

4.1.1 Παραγωγή ισοϋψών από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους

Από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής παράγονται ισοϋψείς καμπύλες ισοδιάστασης 2m από το πακέτο εντολών Spatial Analyst του ArcMap (βλ. σχήμα 4.1). Οι ισοϋψείς καμπύλες χρησιμεύουν στην καλύτερη εποπτεία των υψομετρικών διαφορών της περιοχής μελέτης για την ακριβέστερη χάραξη της κοίτης του ποταμού.

4.1.2 Δημιουργία θεματικών επιπέδων (RAS Layers)

Τα RAS Layers είναι τα θεματικά επίπεδα που περιέχουν πληροφορίες και δεδομένα για τη γεωμετρία του ποταμού και της περιοχής μελέτης.

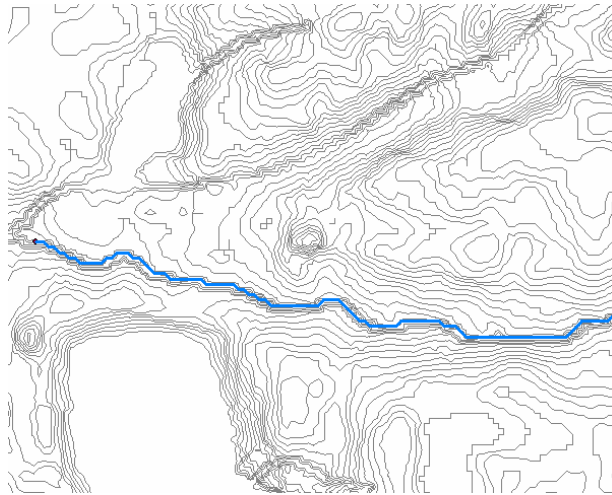
Με την επιλογή RAS Geometry / Create RAS Layers δημιουργείται μια κενή βάση δεδομένων για το εκάστοτε θεματικό επίπεδο. Με το εργαλείο (Edit tool) μπορεί να γίνει η πλήρης επεξεργασία της βάσης. Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκαν πέντε θεματικά επίπεδα:

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


4.1.2.1 Κύρια γραμμή ροής ποταμού (Stream centerline)

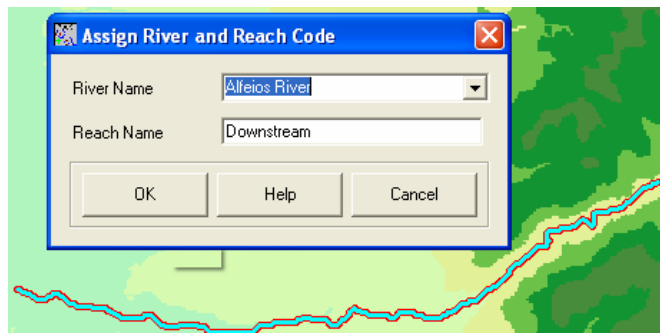
Με βάση το παραχθέν υδρογραφικό δίκτυο του μοντέλου εδάφους ψηφιοποιείται η κύρια γραμμή ροής του υδατορέματος που ενδιαφέρει. Η ψηφιοποίηση γίνεται κατά τη φορά της ροής, όπως απεικονίζεται στο ακόλουθο

σχήμα. Η ακριβής χάραξη της κοίτης είναι αρκετά δύσκολη και θα πρέπει να γίνουν αρκετές δοκιμές για το βέλτιστο αποτέλεσμα.



Σχήμα 4.1: Ισοϋψείς καμπύλες περιοχής μελέτης και ψηφιοποιημένη κύρια γραμμή ροής ποταμού

Αφού ψηφιοποιηθεί η κύρια γραμμή ροής, θα πρέπει στη συνέχεια να ονομαστεί. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση του εργαλείου  (River Reach Id). Το παράθυρο που θα εμφανιστεί (βλ. σχήμα 4.2) επιτρέπει την εισαγωγή του ονόματος του ποταμού και του αντίστοιχου τμήματός του.



Σχήμα 4.2: Ονομασία τμήματος ποταμού

Με την εκτέλεση της εντολής Ras Geometry / Stream Centerline Attribute / All υπολογίζονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- **Topology:** Ελέγχει τη σύνδεση και τον προσανατολισμό των τμημάτων του υδρογραφικού δικτύου που έχει σχηματιστεί.
- **Lengths/Stations:** Υπολογίζει τα μήκη της κύριας γραμμής ροής για κάθε τμήμα και καθορίζει τη φορά της ροής.

- **Elevations:** Μετατρέπει τη διδιάστατη γραμμή ροής σε τριδιάστατη χρησιμοποιώντας το ψηφιακό μοντέλο εδάφους.

4.1.2.2 Κύρια Όχθες (Bank Lines)

Οι όχθες του ποταμού είναι δύο πολυγωνικές γραμμές εκατέρωθεν της κύριας γραμμής του, οι οποίες διαχωρίζουν τη ροή εντός και εκτός της κοίτης του ποταμού. Αν και προαιρετική, η δημιουργία αυτού του θεματικού επιπέδου διευκολύνει τον μετέπειτα ορισμό των οχθών στο HEC RAS.

Οι κανόνες στους οποίους θα πρέπει να θεμελιώνεται η κατασκευή αυτών των γραμμών είναι οι ακόλουθοι :

- Ακριβώς δύο τέτοιες γραμμές πρέπει να τέμνουν κάθε διατομή.
- Ο προσανατολισμός τους δεν έχει σημασία.
- Οι γραμμές μπορεί να είναι συνεχείς ή διακοπτόμενες (π.χ. στην περιοχή της συμβολής).
- Για την ακριβή ψηφιοποίηση των οχθών είναι χρήσιμη και η αξιοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους.

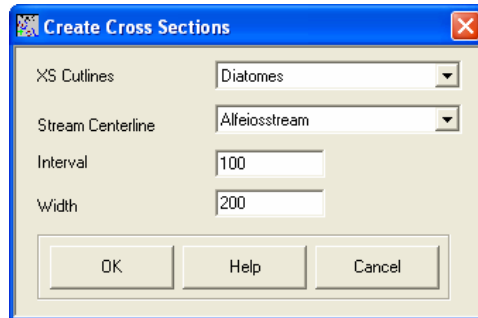
4.1.2.3 Διατομές (Cross-sectional cut lines)

Το θεματικό επίπεδο αυτό αφορά στην κατασκευή διατομών σε αντιπροσωπευτικές θέσεις του ποταμού. Οι διατομές αυτές πρέπει πάντα να σχεδιάζονται κάθετα στη ροή του ποταμού, από αριστερά προς δεξιά κοιτώντας προς τα κατάντη και να καλύπτουν όλη την περιοχή κατάκλισης. Για να σχεδιαστούν οι διατομές όσο το δυνατόν πιο κάθετα στη ροή του ποταμού είναι επιθυμητό να έχουν ήδη κατασκευαστεί οι κύριες διευθύνσεις της ροής⁶.

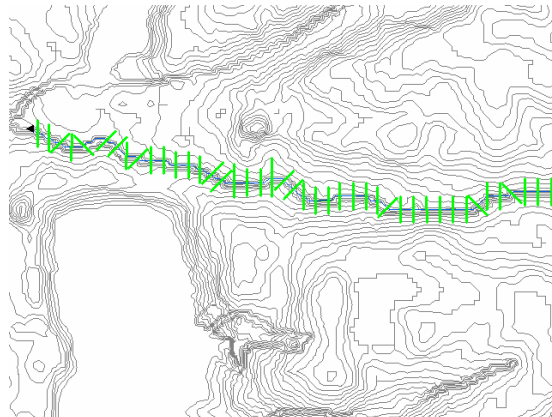
Η κατασκευή του θεματικού αυτού επιπέδου ξεκινάει επιλέγοντας RAS Geometry / Create New Feature / XS Cut Lines. Στη συνέχεια, γίνεται η σχεδίαση των διατομών, μία προς μία, με τη χρήση του εργαλείου Edit Tool (από αριστερά προς δεξιά και κάθετα στη ροή). Εναλλακτικά, οι διατομές μπορούν να κατασκευαστούν αυτόματα όλες μαζί με εφαρμογή του εργαλείου Construct Cut Lines, όπου επιλέγεται από το χρήστη η απόσταση μεταξύ των διατομών καθώς και το μήκος τους (βλ. σχήμα 4.3)

⁶ Οι κύριες διευθύνσεις ροής είναι «νοητές» γραμμές παράλληλες με τις όχθες οι οποίες επιτρέπουν τον υπολογισμό μηκών μεταξύ των διατομών προς τα κατάντη

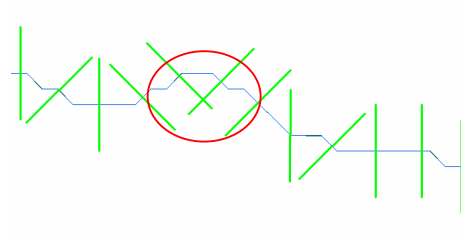
Η εκτέλεση της εντολής συνεπάγεται τη δημιουργία διατομών σε καθορισμένη απόσταση και με καθορισμένο πλάτος. Ωστόσο, γίνεται σαφές ότι υπάρχει η περίπτωση σύμπτωσης δύο ή και περισσότερων διατομών (βλ. σχήματα 4.4 και 4.5), οπότε ο μελετητής καλείται να τροποποιήσει ή να σβήσει κάποια διατομή μέσω της εργαλειοθήκης editor.




Σχήμα 4.3: Κατασκευή διατομών πλάτους 200 m σε ισοδιάσταση 100 m

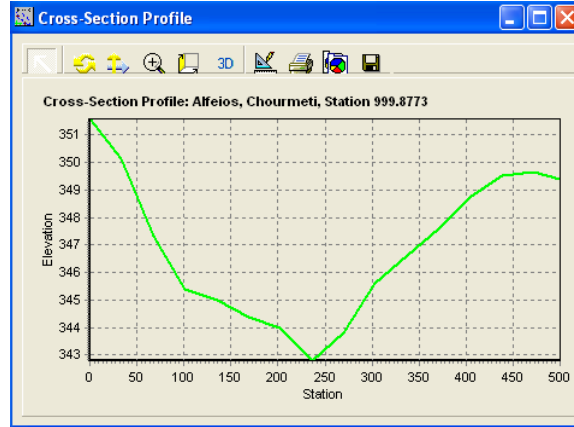


Σχήμα 4.4: Κατασκευή θεματικού επιπέδου διατομών



Σχήμα 4.5: Η περίπτωση σύμπτωσης δύο διατομών

Η επισκόπηση της εκάστοτε διατομής γίνεται από το εργαλείο  (**XS Plot**). Με το εργαλείο αυτό ο μελετητής κρίνει αν η διατομή επεκτείνεται σε υψηλότερα υψόμετρα, αποτυπώνοντας το πλήρες πλημμυρικό πεδίο σε αυτή τη θέση (Κακαβά 2008).

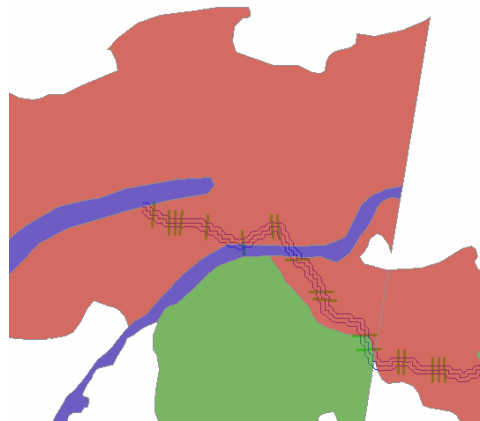


Σχήμα 4.6: Ενδεικτική διατομή της κοίτης του ποταμού Αλφειού

4.1.2.4 Χρήσεις γης (Land uses)

Το θεματικό επίπεδο των χρήσεων γης αξιοποιείται στην εκτίμηση του συντελεστή Manning στη θέση κάθε διατομής. Ανάλογα λοιπόν με το πολύγωνο χρήσης γης εκτιμάται η αντίστοιχη τιμή n του Manning από πίνακες.

Αρχικά, μέσω της επιλογής RAS Geometry -> create RAS layers -> Land use area δημιουργείται το θεματικό επίπεδο των χρήσεων γης. Στο θεματικό αυτό επίπεδο επικολλούνται από το αρχικό layer των χρήσεων γης (βλ. χάρτη 3.4) όσα πολύγωνα τέμνουν τις σχεδιασθείσες διατομές (βλ. σχήμα 4.7). Έτσι, δημιουργείται ένα layer που περιέχει μόνο τα πολύγωνα που χρειάζονται για την εκτίμηση του συντελεστή n στις περιοχές που εκτείνονται οι διατομές.



Σχήμα 4.7: Εξαγωγή πολυγώνων χρήσεων γης που τέμνουν τις γραμμές των διατομών

Εν συνεχεία - αποδίδοντας τιμές του συντελεστή n σε κάθε πολύγωνο αναλόγως της χρήσεως γης - καταρτίζεται πίνακας μέσω της εντολής RAS Geometry -

> Manning N values -> Create LU Manning table (βλ. σχήμα 4.8) και τέλος, εξάγονται οι τιμές που αφορούν κάθε διατομή σε νέο πίνακα μέσω της εντολής RAS Geometry -> Manning n' values -> Extract N values. Όπως γίνεται αντιληπτό, ακόμα και κατά μήκος της ίδιας διατομής μπορεί να απαντώνται διαφορετικοί συντελεστές Manning.

LUCode	N_Value	Description
122	0.015	Road and rail networks and associated land
243	0.035	agriculture, significant natural vegetation
211	0.04	Non-irrigated arable land
242	0.045	Complex cultivation patterns
324	0.03	Transitional woodland-shrub
331	0.025	Beaches, dunes, sands
311	0.04	Broad-leaved forest
321	0.042	Natural grasslands
312	0.045	Coniferous forest
131	0.02	Mineral extraction sites
133	0.02	Construction sites
323	0.045	Sclerophyllous vegetation

Σχήμα 4.8: Απόδοση τιμών συντελεστή Manning σε πολύγωνα χρήσεων γης

4.1.3 Σύνθεση θεματικών επιπέδων και εξαγωγή στο HEC-RAS

Το τελικό βήμα για την παραγωγή του γεωμετρικού αρχείου εισόδου του προγράμματος HEC-RAS είναι η σύνθεση των δημιουργηθέντων θεματικών επιπέδων και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η σύνθεση γίνεται μέσω της εντολής RAS Geometry -> layer setup και η εξαγωγή του αρχείου γίνεται μέσω της εντολής RAS Geometry -> Extract GIS data.

4.2 Υδραυλική Προσομοίωση Υδατορεύματος

Το μοντέλο HEC-RAS είναι ένα πολυχρηστικό εργαλείο για τη μονοδιάστατη ανάλυση και προσομοίωση φυσικών υδατορευμάτων. Πρόκειται για ένα σύνολο μοντέλων με 4 συνιστώσες ανάλυσης (Bruner 2008a):

- Υπολογισμός του προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας σε συνθήκες μόνιμης ροής
- Υπολογισμοί σε συνθήκες μη μόνιμης ροής
- Υπολογισμοί απόθεσης φερτών υλών
- Υπολογισμοί σχετικά με τη θερμοκρασία του νερού

Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο έχει τη δυνατότητα υπολογισμού της στάθμης του νερού για βαθμιαίως μεταβαλλόμενη ροή σε δίκτυο τεχνητών αγωγών, σε

σύστημα υδατορευμάτων με τεχνικά έργα ή φυσικές κοίτες σε συνθήκες υποκρίσιμης ή υπερκρίσιμης ροής. Επίσης, δύνανται να υπολογίσει υδραυλικά άλματα, υδραυλικές συνθήκες σε γέφυρες, ρουφράκτες, οχετούς, υπερχειλιστές (με ή χωρίς θυροφράγματα), στενώσεις καθώς και τη διάβρωση της κοίτης στις γέφυρες.

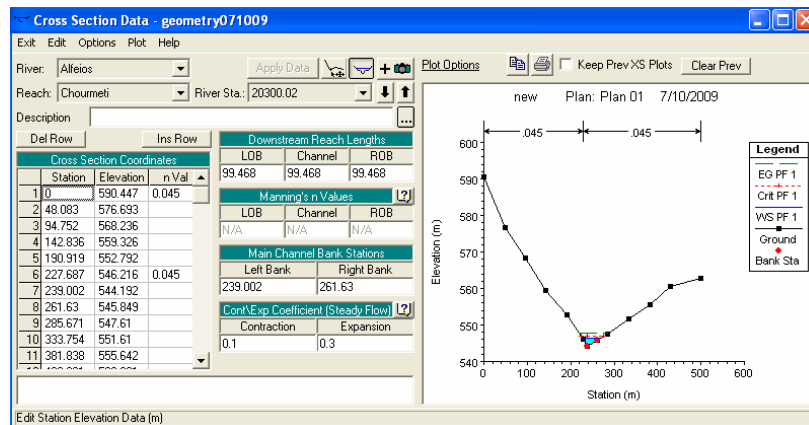
Στην παρούσα εργασία θα γίνει η υδραυλική προσομοίωση επιλεγμένου φυσικού υδατορεύματος σε συνθήκες μόνιμης ροής. Τα βήματα που συνθέτουν τη διαδικασία υδραυλικής προσομοίωσης συνοψίζονται ως εξής:

- Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων
- Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων
- Ρύθμιση παραμέτρων και εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών
- Επισκόπηση αποτελεσμάτων
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο HEC-GeoRAS
- Σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών
- Σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλισης

4.2.1 Εισαγωγή γεωμετρικών δεδομένων

Η εισαγωγή των γεωμετρικών δεδομένων, που παρήχθησαν από το HEC-GeoRAS γίνεται μέσω της εντολής File -> Geometric Data από το κεντρικό παράθυρο του HEC RAS και στη συνέχεια File -> Import Geometry -> GIS Format (από το παράθυρο των γεωμετρικών στοιχείων).

Έπειτα, θα πρέπει να επεξεργαστούν τα γεωμετρικά δεδομένα των διατομών. Αυτό γίνεται με την εφαρμογή της εντολής (Edit Cross Section). Με αυτή την εντολή εμφανίζονται όλα τα χαρακτηριστικά μιας διατομής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.11.



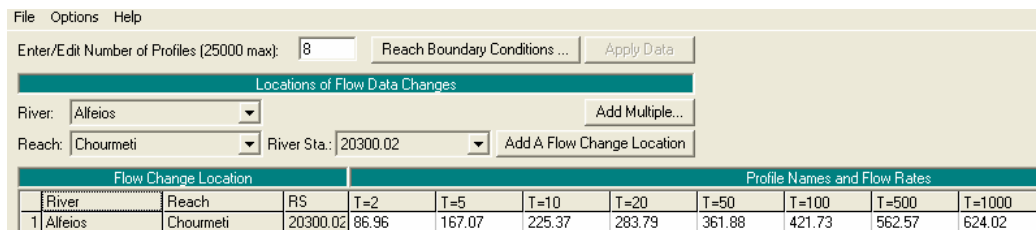
Σχήμα 4.9: Επεξεργασία των γεωμετρικών στοιχείων κάθε διατομής

Στο παράθυρο αυτό ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τα ακόλουθα στοιχεία:

- River / Reach: Όνομα / τμήμα του ποταμού στο οποίο ανήκει η διατομή
- River Sta: Κωδικός αριθμός της διατομής
- Cross Section Coordinates: Πίνακας με όλα τα σημεία της διατομής, την απόστασή τους από το αριστερό της άκρο (Station), και το αντίστοιχο υψόμετρό τους (Elevation)
- Downstream Reach Lengths: Αποστάσεις δυο διαδοχικών διατομών κατά μήκος των κύριων διευθύνσεων ροής
- Main Channel Bank Stations: Αποστάσεις της αριστερής και της δεξιάς όχθης από το αριστερό άκρο της διατομής (δεν έγινε υπολογισμός στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας)
- Cont / Exp Coefficients: Προεπιλεγμένες τιμές για τον υπολογισμό των συντελεστών τοπικών απωλειών σε συστολή και διαστολή αντίστοιχα

4.2.2 Εισαγωγή υδρολογικών δεδομένων

Οι ρυθμίσεις της μόνιμης ροής εισάγονται στο HEC-RAS μέσω της εντολής Edit/Steady flow data, με την οποία εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 4.12. Τα δεδομένα συνίστανται σε έναν αριθμό διαφορετικών προφίλ⁷ για τα οποία εισάγονται οι αντίστοιχες πλημμυρικές αιχμές (στην πλέον ανάντη διατομή)⁸ και οι οριακές συνθήκες. Οι ονομασίες των προφίλ επιλέγονται από το χρήστη μέσω της εντολής Edit/Profile names. Η δόμηση του υδρολογικού αρχείου γίνεται για κάθε τμήμα (Reach) του ποταμού ξεχωριστά, κάτι το οποίο δεν εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, όπου μελετάται ένα μοναδικό τμήμα του Αλφειού ποταμού.



Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates								
River	Reach	RS	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100	T=500	T=1000	
1	Alfeios	Chourmeti	20300.02	86.96	167.07	225.37	283.79	361.88	421.73	562.57	624.02

Σχήμα 4.10: Παράθυρο εισαγωγής υδρολογικών δεδομένων μόνιμης ροής

⁷ Ως προφίλ νοείται κάθε διαφορετική ανάλυση / προσομοίωση με βάση ξεχωριστό επεισόδιο βροχόπτωσης συγκεκριμένης διάρκειας και περιόδου επαναφοράς.

⁸ Οι πλημμυρικές αιχμές για κάθε προφίλ συμπληρώθηκαν με βάση τα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης του HEC-HMS.

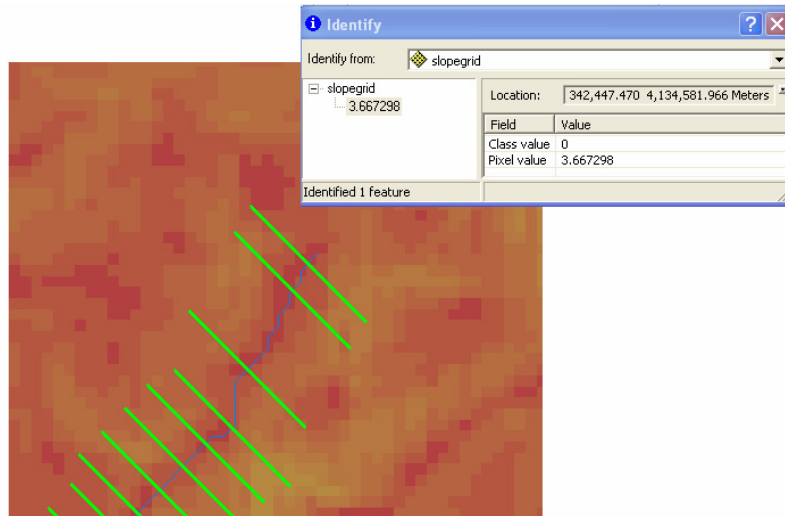
Η ολοκλήρωση της εισαγωγής των υδρολογικών δεδομένων επιτυγχάνεται με τον ορισμό των οριακών συνθηκών του προβλήματος. Οι οριακές συνθήκες αποτελούν ουσιαστικά το σημείο έναρξης της βήμα προς βήμα ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό των επιμέρους στοιχείων της εξίσωσης ενέργειας. Η θέση, όπου ορίζονται οι οριακές συνθήκες εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος. Συνεπώς, για θεώρηση υπερκρίσιμης ροής, οι υπολογισμοί γίνονται από κατάντη προς ανάντη και η οριακή συνθήκη ορίζεται στην πλέον ανάντη θέση. Ανάλογα, στην περίπτωση της υποκρίσιμης ροής οι υπολογισμοί γίνονται από ανάντη προς κατάντη και τέλος στην περίπτωση μικτής ροής χρειάζεται ορισμός οριακής συνθήκης και στα δύο άκρα.

Στην παρούσα εργασία, λόγω των σχετικά έντονων κλίσεων εδάφους γίνεται η θεώρηση για ύπαρξη υπερκρίσιμης ροής (κάτι το οποίο επιβεβαιώθηκε αργότερα από τα αποτελέσματα) και συνεπώς χρειάζεται ο ορισμός οριακής συνθήκης στο πλέον ανάντη σημείο. Ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να επιλέξει μια εκ των παρακάτω επιλογών:

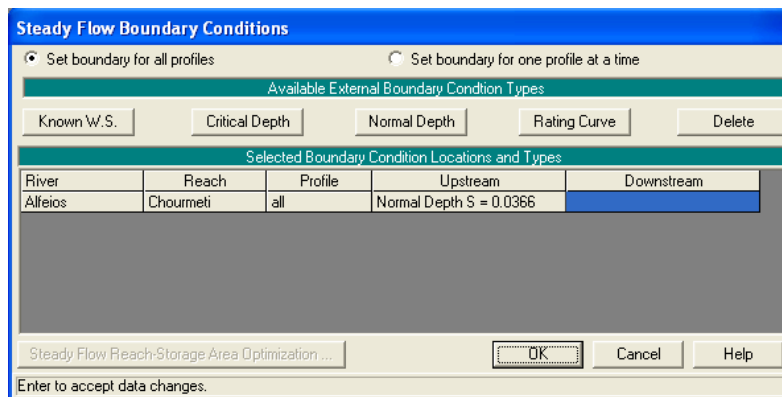
- **Known Water Surface Elevation** (Γνωστό πιεζομετρικό φορτίο): Για αυτή την οριακή συνθήκη, ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει ένα πιεζομετρικό φορτίο για κάθε προφίλ.
- **Critical Depth** (Κρίσιμο βάθος): Με αυτήν την επιλογή δε χρειάζεται καμία επιπλέον πληροφορία. Το πρόγραμμα υπολογίζει από μόνο του το κρίσιμο βάθος για κάθε προφίλ και το χρησιμοποιεί σαν οριακή συνθήκη.
- **Normal Depth** (Ομοιόμορφο βάθος): Εισάγεται η κλίση της γραμμής ενέργειας, για να υπολογιστεί κατόπιν το ομοιόμορφο βάθος για κάθε προφίλ. Όταν η κλίση αυτή δεν είναι γνωστή, ο χρήστης μπορεί να την προσεγγίσει είτε με χρήση της κλίσης της ελεύθερης επιφάνειας είτε με χρήση της κλίσης του πυθμένα (Bruner 2008b).
- **Rating Curve** (Καμπύλη στάθμης – παροχής): Μόλις επιλεγεί αυτή η οριακή συνθήκη εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο, στο οποίο ο χρήστης μπορεί να εισάγει ζεύγη τιμών στάθμης – παροχής. Από την καμπύλη αυτή το πρόγραμμα μπορεί με παρεμβολή να υπολογίσει το πιεζομετρικό φορτίο για την αντίστοιχη παροχή.

Εξαιτίας της απουσίας στοιχείων υδρομέτρησης στην περιοχή επιλέγεται ως ανάντη οριακή συνθήκη, το ομοιόμορφο βάθος (βλ. σχήμα 4.14), το οποίο προκύπτει από την κλίση του πυθμένα (πολύ καλή προσέγγιση της γραμμής ενέργειας – Bruner 2008b).

Κατασκευάζεται λοιπόν, σε περιβάλλον ArcMap (εντολή spatial analyst -> slope), ο κάρναβος των κλίσεων εδάφους (βλ. χάρτη 3.2), από τον οποίο προκύπτει κλίση = 0,03667 στο ανάντη σημείο (βλ. σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.11: Εύρεση κλίσης πυθμένα στο πλέον ανάντη σημείο



Σχήμα 4.12: Ορισμός ομοιόμορφου βάθους στην πλέον ανάντη διατομή

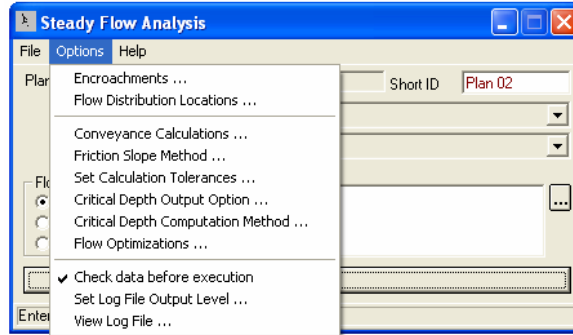
4.2.3 Ρύθμιση παραμέτρων και εκτέλεση υδραυλικών υπολογισμών

Η εκτέλεση των υδραυλικών υπολογισμών είναι το τελευταίο βήμα για την προσομοίωση σε περιβάλλον HEC-RAS. Η διεργασία πραγματοποιείται από την εντολή Run -> steady flow analysis, όπου ο χρήστης καθορίζει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Ονομασία σχεδίου (Plan ID)
- Μήτρα γεωμετρικών δεδομένων (Geometry file)
- Μήτρα υδρολογικών δεδομένων μόνιμης ροής (Steady flow file)

- Είδος ροής (εδώ ισχύει η παραδοχή για υπερκρίσιμη ροή λόγω των έντονων κλίσεων εδάφους)

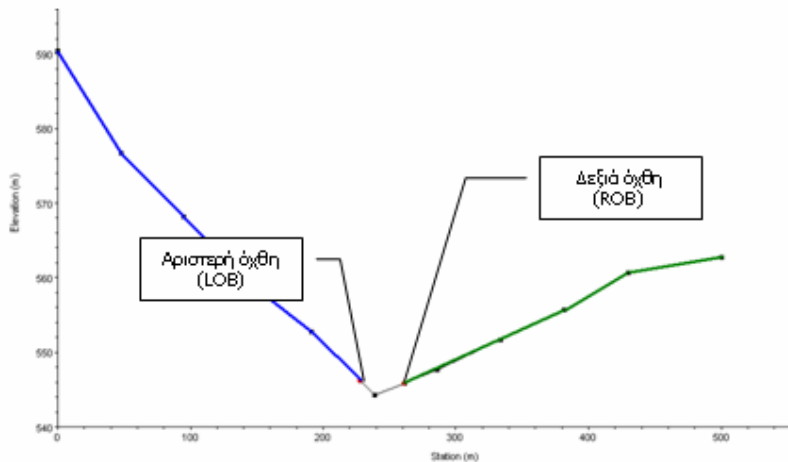
Για την ακριβέστερη προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών ροής, θα πρέπει να ρυθμιστούν κάποιες παράμετροι του μοντέλου (βλ. σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Ρύθμιση παραμέτρων υδραυλικού μοντέλου

4.2.3.1 Επιλογή διατομών μελέτης

Η εντολή «Flow distribution locations» αφορά στην επιλογή διατομών για την προσομοίωση και διαίρεση διατομής σε τρία τμήματα (κοίτη, πέραν της αριστερής και πέραν της δεξιάς όχθης) ή περαιτέρω (στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η αρχική προεπιλογή των τριών τμημάτων – βλ. σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.14: Διαχωρισμός διατομής σε τμήματα μελέτης

4.2.3.2 Παράμετροι επίλυσης της εξίσωσης ενέργειας

Σε συνθήκες μόνιμης ροής το HEC-RAS υπολογίζει την ελεύθερη επιφάνεια του νερού επιλύοντας ουσιαστικά την εξίσωση της ενέργειας σε μονοδιάστατη ανάλυση. Η επίλυση γίνεται από διατομή σε διατομή διαδοχικά με επαναληπτικό αλγόριθμο, με

στόχο τη μεγαλύτερη σύγκλιση μεταξύ 2 υπολογισμένων πιεζομετρικών βαθών για την ίδια διατομή.

Πιο αναλυτικά, η εξίσωση ενέργειας ανάμεσα σε δύο διαδοχικές διατομές (βλ. διάγραμμα 4.2) είναι:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (\text{E.4.1})$$

Όπου,

Z_1, Z_2 : Υψόμετρα του πυθμένα υδατορεύματος σε δύο διαδοχικές διατομές

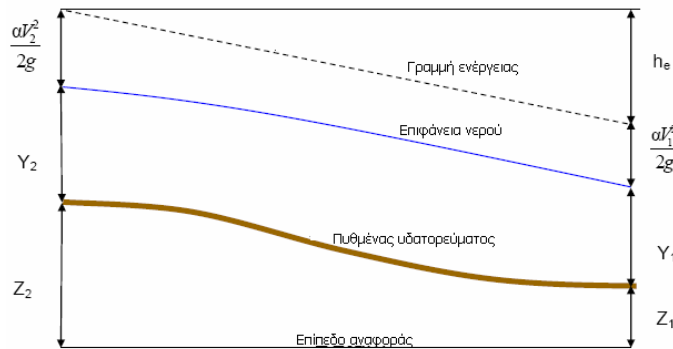
Y_1, Y_2 : Βάθη νερού

a_1, a_2 : Συντελεστές συνόρθωσης κινητικής ενέργειας ταχύτητας

V_1, V_2 : Μέσες ταχύτητες διατομών (Παροχή / Εμβαδόν διατομής)

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

h_e : Ολικές απώλειες ενέργειας (γραμμικές και τοπικές)



Διάγραμμα 4.2: Απεικόνιση μεγεθών της εξίσωσης ενέργειας [(Bruner 2008b) – μετά από επεξεργασία]

Το ολικό ύψος των απωλειών ενέργειας συνίσταται στο ύψος των γραμμικών και στο ύψος των τοπικών απωλειών με βάση την ακόλουθη σχέση.

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (\text{E.4.2})$$

L Μέση σταθμισμένη απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών διατομών

\bar{S}_f Απώλειες λόγω τριβής

C Συντελεστής συστολής / διαστολής για τις τοπικές απώλειες ενέργειας (0.3 για διαστολή και 0.1 για συστολή της διατομής)

$\left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right|$ Διαφορά κινητικής ενέργειας μεταξύ των 2 διαδοχικών διατομών

Γραμμικές απώλειες ενέργειας

Για τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών ενέργειας υπολογίζεται αρχικά η μέση σταθμισμένη (ως προς τις παροχές) απόσταση μεταξύ των διαδοχικών διατομών με βάση τη σχέση Ε.4.3.

$L = \frac{L_{lob} \bar{Q}_{lob} + L_{ch} \bar{Q}_{ch} + L_{rob} \bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$ <p>(Ε.4.3)</p>	L_{lob}, L_{rob}, L_{ch} : Αποστάσεις μεταξύ διατομών κατά μήκος των δ/νσεων ροής για το αριστερό τμήμα, το δεξί τμήμα και την κοίτη αντίστοιχα	Q_{lob}, Q_{rob}, Q_{ch} : Μέσες παροχές μεταξύ διατομών στο αριστερό τμήμα, το δεξί τμήμα και την κοίτη αντίστοιχα (βλ. σχήμα 4.15)
---	--	---

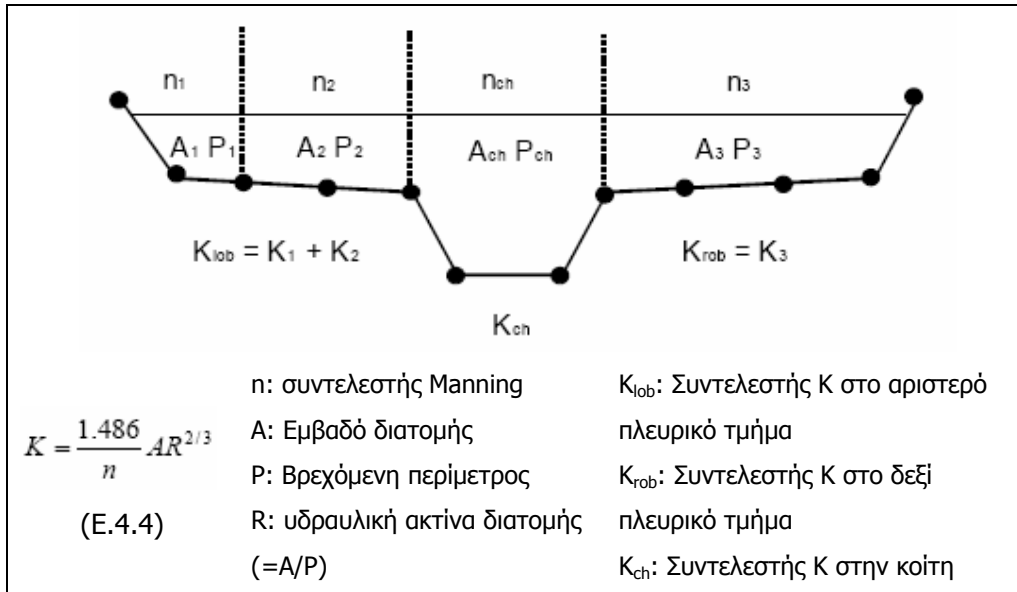
Downstream Reach Lengths					
		LOB	Channel	ROB	
		95.953	100.468	101.465	
		Left OB	Channel	Right OB	
Q Total (m3/s)	86.96	Flow (m3/s)	5.00	73.01	8.95

Σχήμα 4.15: Παροχές διατομών στο αριστερό, κεντρικό και δεξί τμήμα της διατομής

Εν συνεχεία, μέσω της εντολής «Conveyance calculations» υπολογίζεται για κάθε διατομή ο συντελεστής μεταφοράς K. Τελικώς, επελέγη η μέθοδος «At breaks in n values only», σύμφωνα με την οποία τα δύο πλευρικά τμήματα της διατομής (πέραν της αριστερής και πέραν της δεξιάς όχθης) χωρίζονται σε επιπλέον τμήματα ανάλογα με το αν αλλάζει ο συντελεστής Manning n ή όχι, έτσι ώστε κάθε τμήμα να έχει μια ενιαία τιμή n (βλ.σχήμα 4.7).

Στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή K_i για κάθε τμήμα ενιαίου συντελεστή n και επιμέρους τιμές αθροίζονται για να προκύψουν οι τιμές K_{lob} για το αριστερό πλευρικό τμήμα και K_{rob} για το δεξί πλευρικό τμήμα (βλ. σχήμα 4.16). Το τμήμα εντός της κοίτης αντιμετωπίζεται γενικά ως ενιαίο αλλά ο χρήστης μπορεί να εισάγει περισσότερες τιμές συντελεστή τραχύτητας αν κριθεί σκόπιμο με βάση και το κριτήριο των πλευρικών κλίσεων (Ραδαίος 2006).

Ο ολικός συντελεστής K για όλη τη διατομή προκύπτει από το άθροισμα $K_{lob} + K_{ch} + K_{rob}$.



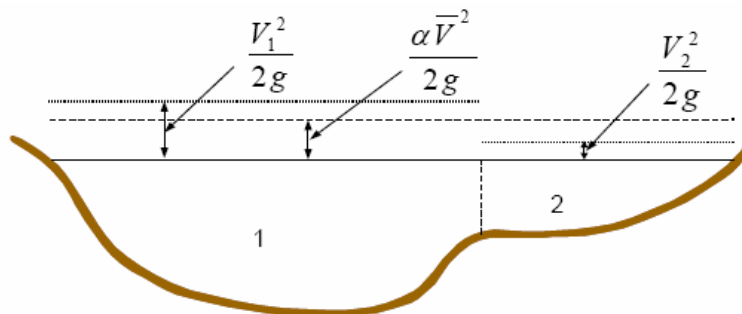
Σχήμα 4.16: Υπολογισμός συντελεστή K για όλη τη διατομή

Ο υπολογισμός των απωλειών λόγω τριβής εκτελείται μέσω της εντολής «Friction slope methods», όπου διατίθενται 6 επιλογές, εκ των οποίων τελικά επελέγη η μέθοδος του μέσου όρου «Average conveyance». Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η μέση κλίση γραμμής ενέργειας δίνεται από τη σχέση E.4.5:

$\bar{s}_f = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2$ (E.4.5)	Q_1, Q_2 : Μέσες παροχές στις 2 διαδοχικές διατομές K_1, K_2 : Συντελεστής K για κάθε διατομή
--	--

Τοπικές απώλειες ενέργειας

Μετά τον υπολογισμό των γραμμικών απωλειών έπεται η εκτίμηση των τοπικών απωλειών. Εκτός του συντελεστή συστολής/διαστολής απαιτείται και ο υπολογισμός της μέσης κινητικής ενέργειας κάθε διατομής με βάση το σχήμα 4.17 και τη σχέση E.4.6.



Σχήμα 4.17: Υπολογισμός μέσης κινητικής ενέργειας διατομής

$a \frac{\bar{V}^2}{2g} = \frac{Q_1 \frac{V_1^2}{2g} + Q_2 \frac{V_2^2}{2g}}{Q_1 + Q_2}$ <p>(E.4.6)</p>	<p>V_1, V_2: Ταχύτητα στο αριστερό και δεξί αντίστοιχα πλευρικό τμήμα της διατομής Q_1, Q_2: Παροχή στο αριστερό και δεξί αντίστοιχα πλευρικό τμήμα της διατομής V: Η μέση ταχύτητα όλης της διατομής</p>
---	--

Λύνοντας ως προς a και απλοποιώντας το $2g$ λαμβάνουμε την έκφραση E.4.7 για τον υπολογισμό του συντελεστή συνόρθωσης κινητικής ενέργειας για τη διατομή, που μελετάται.

$$a = \frac{Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2}{(Q_1 + Q_2) \bar{V}^2} \quad (E.4.7)$$

Έχοντας υπολογίσει τους συντελεστές συνόρθωσης και τις μέσες κινητικές ενέργειες κάθε διατομής υπολογίζουμε τις τοπικές απώλειες ενέργειας οι οποίες ισούνται (βλ. σχέση E.4.2) με:

$C \left \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right $	<p>Όπου: C: Συντελεστής συστολής / διαστολής για τις τοπικές απώλειες ενέργειας (0.3 για διαστολή και 0.1 για συστολή της διατομής) a_1, a_2: Συντελεστές συστολής / διαστολής δύο διαδοχικών διατομών V_1, V_2: Ταχύτητες δύο διαδοχικών διατομών</p>
--	--

Για την εκτέλεση της επαναληπτικής προσομοίωσης του αλγορίθμου, έχει καθοριστεί εξ αρχής αν το καθεστώς ροής είναι υπερκρίσιμο ή υποκρίσιμο. Στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε υπερκρίσιμη ροή, κάτι το οποίο σημαίνει ότι οι υπολογισμοί γίνονται από κατάντη προς ανάντη και καθορίζεται οριακή συνθήκη στην πλέον ανάντη διατομή.

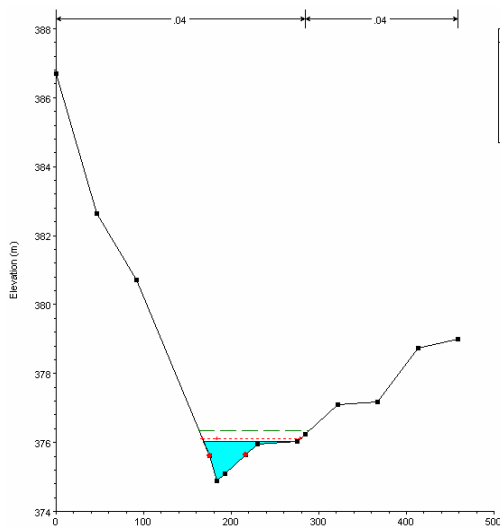
Τέλος, κατά τη διάρκεια των υπολογισμών το πρόγραμμα υπολογίζει το κρίσιμο βάθος - με μέθοδο που ορίζεται από την εντολή «Critical Depth Computation Method» - και το συγκρίνει με το πιεζομετρικό βάθος στην διατομή μελέτης, συμβάλλοντας στον έλεγχο της ορθότητας των εισαχθέντων δεδομένων. Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό του κρίσιμου βάθους επελέγη η παραβολική μέθοδος, η οποία είναι η ταχύτερη και προτείνεται από τους κατασκευαστές του HEC-RAS (Bruner 2008b).

4.2.4 Επισκόπηση αποτελεσμάτων

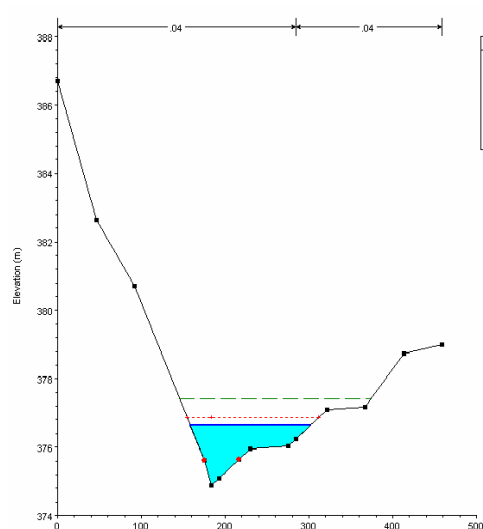
Το τελικό βήμα για την παραγωγή του γεωμετρικού αρχείου εισόδου του προγράμματος HEC-RAS είναι η σύνθεση των δημιουργηθέντων θεματικών επιπέδων και του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Η σύνθεση γίνεται μέσω της εντολής RAS

Geometry -> layer setup και η εξαγωγή του αρχείου γίνεται μέσω της εντολής RAS Geometry -> Extract GIS data.

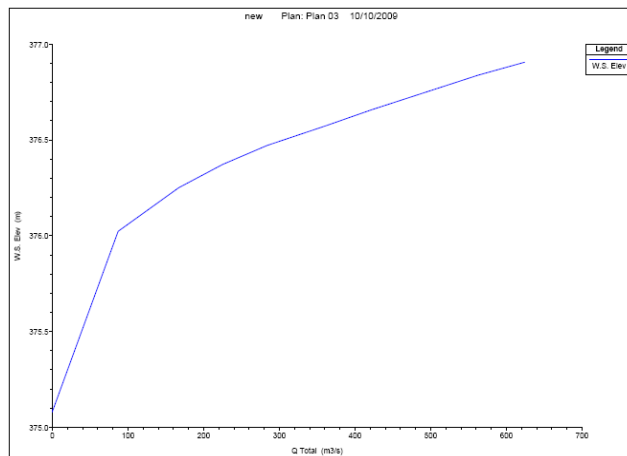
Το πρόγραμμα προσφέρει μεγάλη ποικιλία επισκόπησης των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων και πινάκων για τις διατομές και τη μηκοτομή του ποταμού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά γραφήματα από την υδραυλική προσομοίωση του Αλφειού ποταμού για μια τυχαία διατομή, καθώς επίσης και ένα τρισδιάστατο γραφικό απεικόνιση της πλημμυρικής κατάκλισης σε όλο το τμήμα μελέτης για δύο περιόδους επαναφοράς.



Διάγραμμα 4.3: Διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 2 ετών⁹

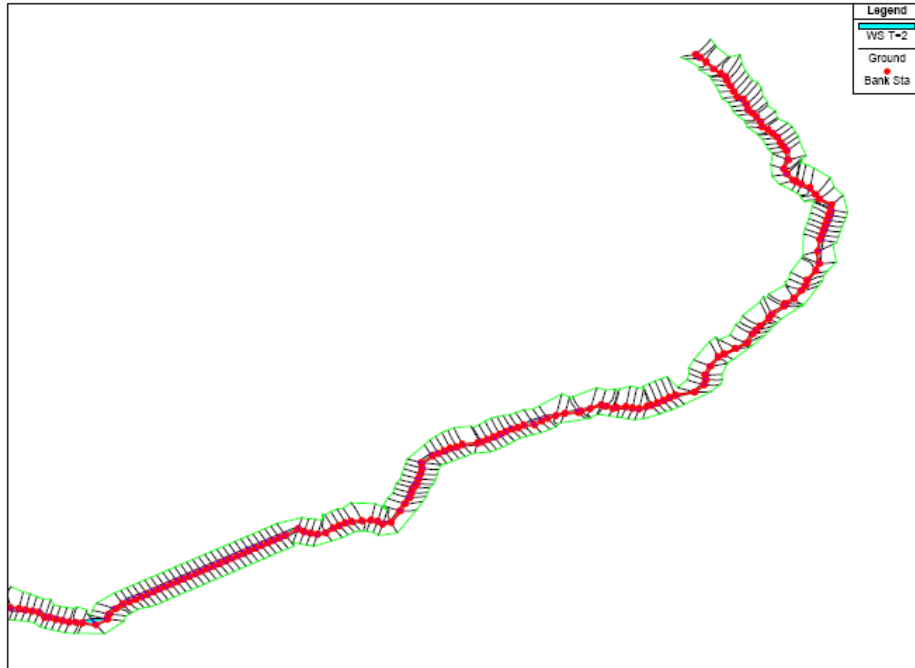


Διάγραμμα 4.4: Διατομή ποταμού για πλημμύρα επαναφοράς 100 ετών

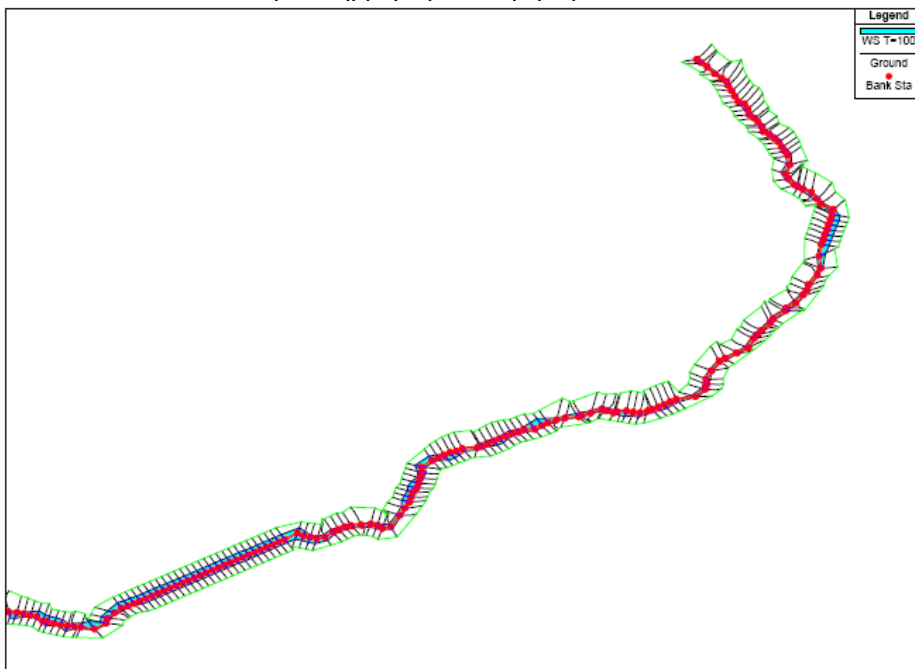


Διάγραμμα 4.5: Μεταβολή στάθμης στη διατομή με την αύξηση της πλημμυρικής παροχής

⁹ WS: Πιεζομετρικό φορτίο, EG: Γραμμή ενέργειας, Bank Sta: Όχθες, Crit: Κρίσιμο βάθος



Σχήμα 4.18: Τρισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρας επαναφοράς 2 ετών



Σχήμα 4.19: Τρισδιάστατη απεικόνιση πλημμυρικής κατάκλυσης για πλημμύρας επαναφοράς 100 ετών

4.2.5 Εξαγωγή αποτελεσμάτων στο HEC-GeoRAS

Αφού ολοκληρωθούν οι υδραυλικοί υπολογισμοί δίδεται η δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε περιβάλλον HEC-GeoRAS με σκοπό τη σύνθεση χαρτών με τα

πιεζομετρικά βάθη και τα πολύγωνα των πλημμυρικών κατακλύσεων. Η διεργασία εκτελείται από την εντολή File -> export GIS data, όπου ο χρήστης παράγει αρχείο τύπου «.sdf»¹⁰ με τα δεδομένα που τον ενδιαφέρουν.

Η εισαγωγή των υδραυλικών δεδομένων στο HEC-GeoRAS συνοδεύεται απαραίτητα από τη συσχέτιση με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, στο οποίο άλλωστε έγιναν και οι αρχικοί υπολογισμοί. Στο παράθυρο εντολών RAS Mapping -> Layer setup ο χρήστης καθορίζει επίσης το μέγεθος του φατνίου στον κάρναβο με τα βάθη του νερού. Το κατάλληλο μέγεθος εξαρτάται από την ανάλυση του ΨΜΕ. Στην παρούσα εργασία το μέγεθος του φατνίου ορίστηκε ίσο με 34 μέτρα (όσο και το αντίστοιχο φατνίο του ΨΜΕ).

Αφού συμπληρωθεί το παράθυρο Layer Setup με τις κατάλληλες ρυθμίσεις, επιλέγεται RAS Mapping -> Read RAS GIS Export File, ώστε να διαβαστεί ο φάκελος εξόδου. Με αυτή τη διαδικασία, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους εισάγεται στο χάρτη και ταυτόχρονα ένα αντίγραφο του μετατρέπεται σε μορφή raster (με μέγεθος φατνίου αυτό που ορίστηκε προηγουμένως). Τέλος, δημιουργούνται δύο νέα θεματικά επίπεδα μέσα στη βάση δεδομένων, ένα για τις διατομές και ένα για τα όρια των κατακλύσεων.

4.2.6 Σύνθεση πιεζομετρικών χαρτών

Σε πρώτη φάση, κατασκευάζεται ένα τρισδιάστατο μοντέλο της υδάτινης επιφάνειας από τις διατομές και το πιεζομετρικό φορτίο σε κάθε διατομή. Με την εντολή RAS Mapping -> Inundation Mapping -> Water Surface Generation δημιουργούνται οι πιεζομετρικές επιφάνειες για τα διάφορα πλημμυρικά επεισόδια και ονομάζονται με το πρόθεμα «t» και το όνομα του κάθε προφίλ.

4.2.7 Σύνθεση χαρτών πλημμυρικής κατάκλυσης

Στο δεύτερο και τελευταίο βήμα, η πιεζομετρική επιφάνεια - που έχει παραχθεί από την προηγούμενη διαδικασία - συνδυάζεται με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Σκοπός είναι ο υπολογισμός των ακριβών ορίων της κατάκλυσης και των βαθών του νερού για όλο το πλημμυρικό πεδίο. Με την εντολή RAS Mapping -> Inundation Mapping -> Floodplain delineation, το ψηφιακό μοντέλο της πιεζομετρικής επιφάνειας

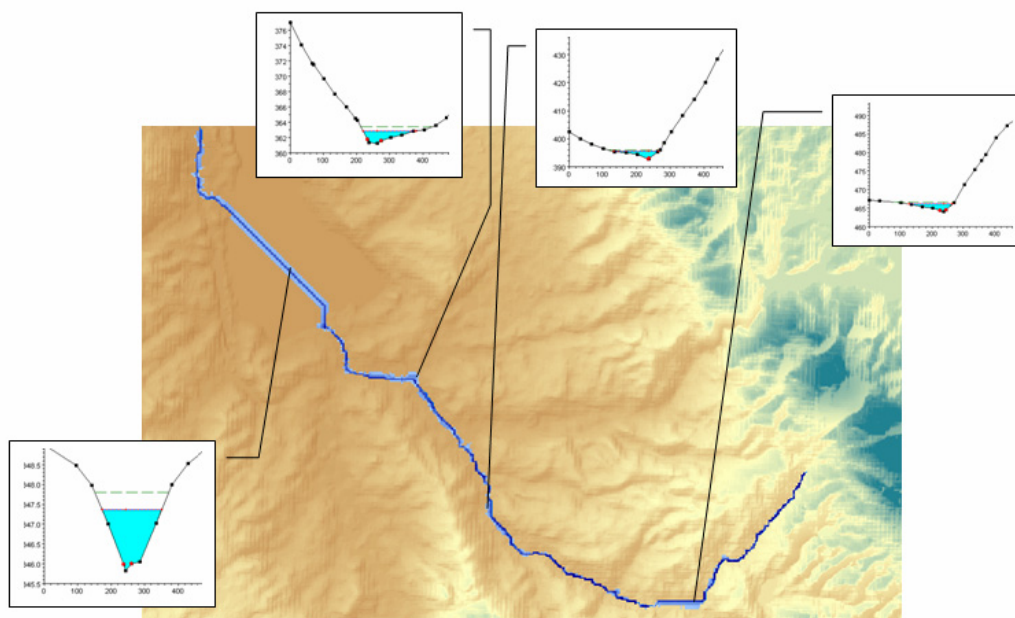
¹⁰ Το αρχείο .sdf μετατρέπεται σε αναγνώσιμο από το HEC-GeoRAS αρχείο .xml με το εργαλείο «convert sdf to xml».

συγκρίνεται με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Στα σημεία, όπου το υψόμετρο της πιεζομετρικής επιφάνειας είναι μεγαλύτερο από το υψόμετρο εδάφους υπολογίζεται η διαφορά των δύο υψομέτρων, η οποία αντιπροσωπεύει το αντίστοιχο βάθος του νερού στη θέση.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται αρχεία που περιέχουν τα βάθη του νερού για τα διάφορα πλημμυρικά επεισόδια και ονομάζονται με το πρόθεμα «d» και το όνομα του κάθε προφίλ.

Παράλληλα, κατασκευάζονται πολύγωνα που περιέχουν τα ακριβή όρια της κατάκλυσης για το κάθε προφίλ, τα οποία ονομάζονται με το πρόθεμα «b» και το όνομα του αντίστοιχου προφίλ.

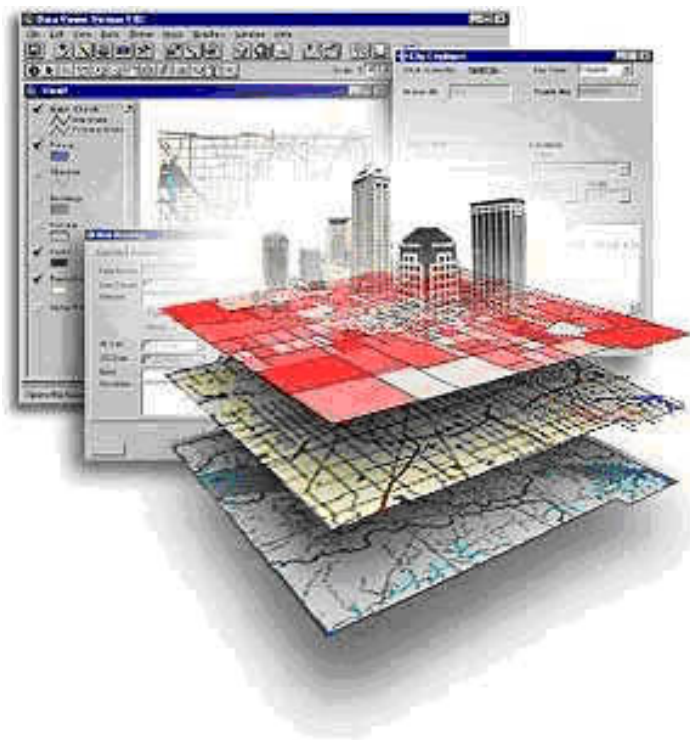
Στο σχήμα 4.20 απεικονίζεται ο παραχθείς χάρτης με τα βάθη νερού για πλημμύρα επαναφοράς 100 ετών και παρατίθενται ενδεικτικές διατομές για τη διαμόρφωση σαφέστερη εικόνας από τον αναγνώστη για το εύρος της πλημμυρικής κατάκλυσης.



Σχήμα 4.20: Χάρτης πλημμυρικής κατάκλυσης και 4 επιλεγμένες διατομές για πλημμύρα επαναφοράς 100 ετών

Στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα της χαρτοσύνθεσης για περιόδους επαναφοράς $T=2,10,20,50,100,1000$.

Κεφάλαιο 5 **Αποτελέσματα Αναλύσεων και Σύνθεση Χαρτών**



Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται επιλεγμένα αποτελέσματα της υδρολογικής προσομοίωσης για 6 περιόδους επαναφοράς. Η υδρολογική προσομοίωση, σε συνδυασμό με την υδραυλική προσομοίωση, οδήγησαν στη σύνθεση έξι χαρτών πιεζομετρικού βάθους και έξι χαρτών αποτύπωσης της πλημμυρικής κατάκλισης.

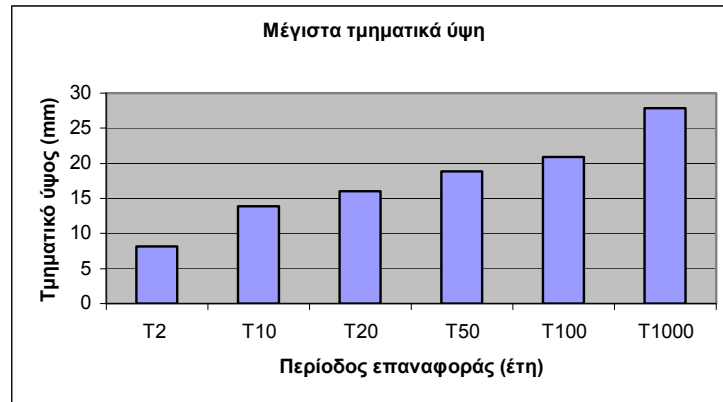
Θεματικοί Άξονες Κεφαλαίου

- Αποτελέσματα υδρολογικής & υδραυλικής προσομοίωσης
- Χαρτογραφικά προϊόντα

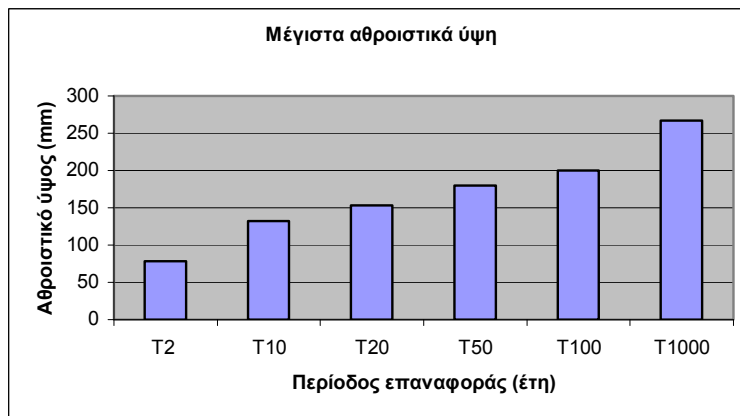
5 Αποτελέσματα Αναλύσεων & Σύνθεση Χαρτών

5.1 Υδρολογική Προσομοίωση Λεκάνης

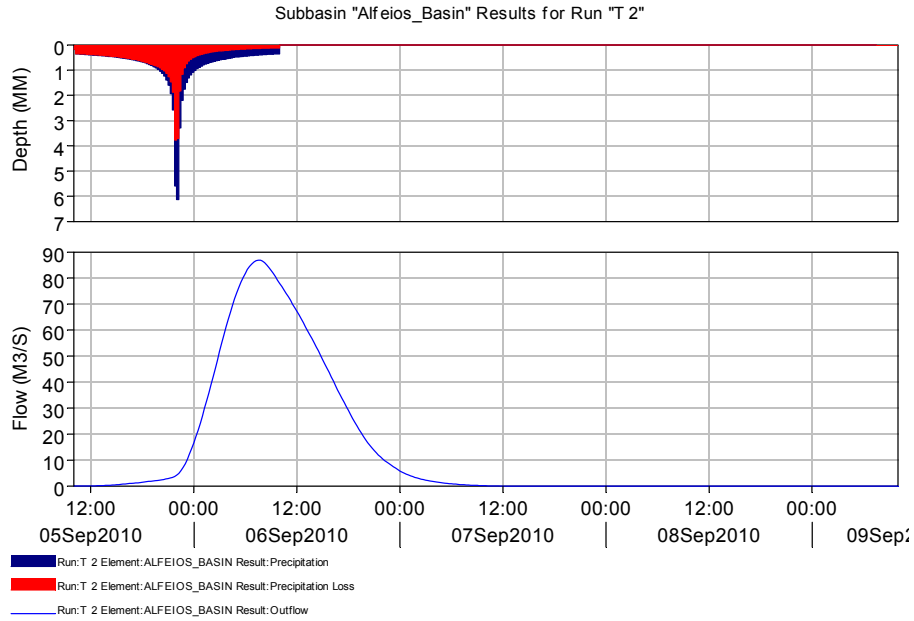
Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζονται επιλεγμένα αποτελέσματα από την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης του Άνω Αλφειού για έξι περιόδους επαναφοράς. Αρχικά, παρατίθεται συγκεντρωτική εικόνα από τα έξι υετογραφήματα σχεδιασμού, έπειτα ακολουθούν τα έξι πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού (αντιπαραβαλλόμενα με τα υετογραφήματα ενεργού βροχής και απωλειών) και τέλος δίνεται πίνακας με τις υπολογισθείσες παροχές αιχμής ανά περίοδο επαναφοράς.



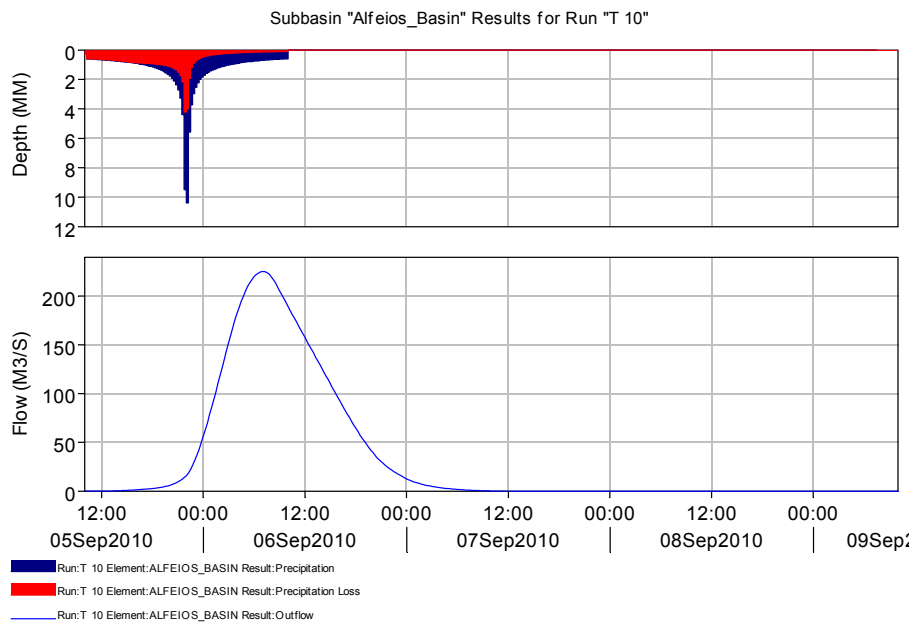
Διάγραμμα 5.1: Μέγιστα 15-λεπτα τμηματικά ύψη βροχής διάρκειας 24 h



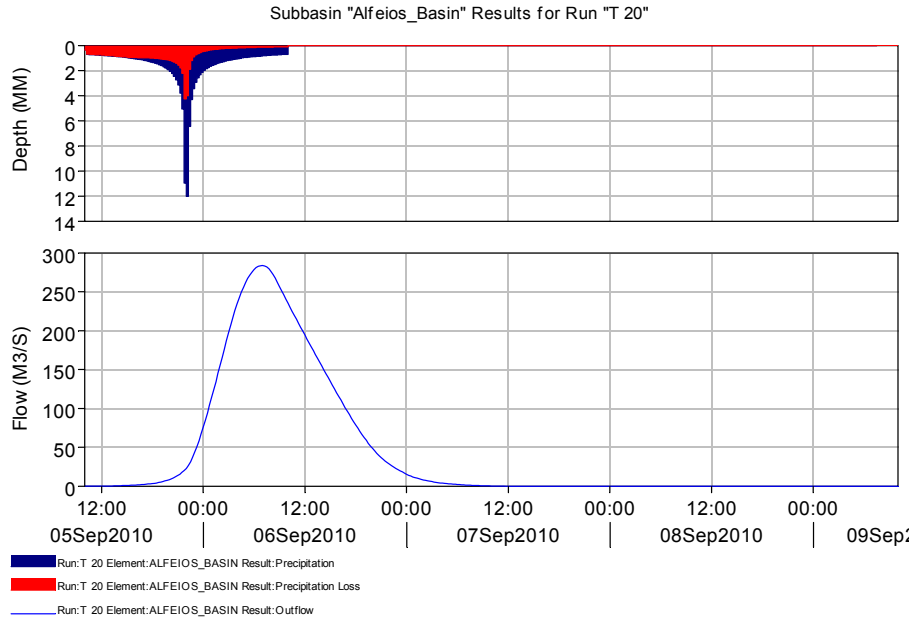
Διάγραμμα 5.2: Μέγιστα αθροιστικά ύψη βροχής διάρκειας 24 h



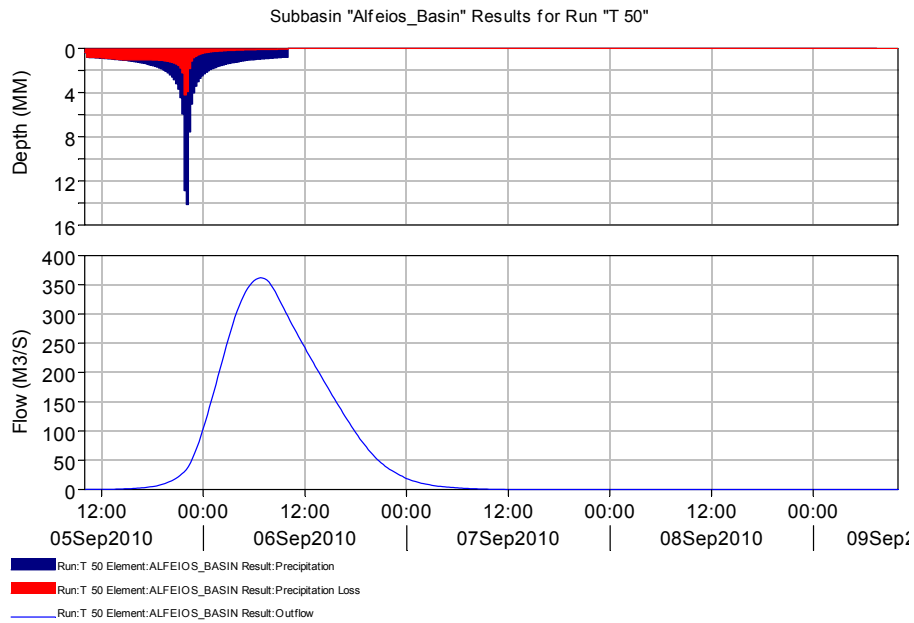
Διάγραμμα 5.3: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h επαναφοράς 2 ετών



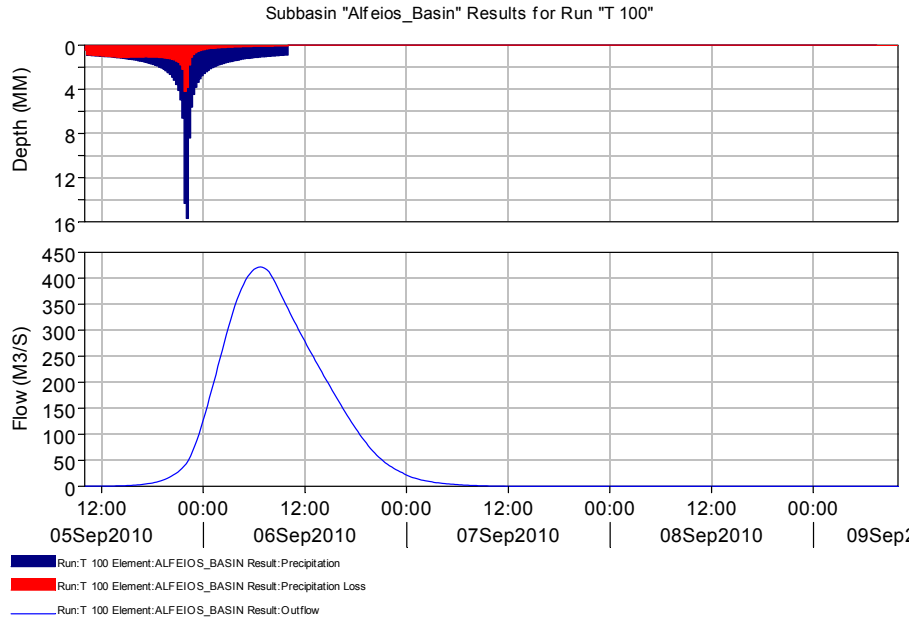
Διάγραμμα 5.4: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h επαναφοράς 10 ετών



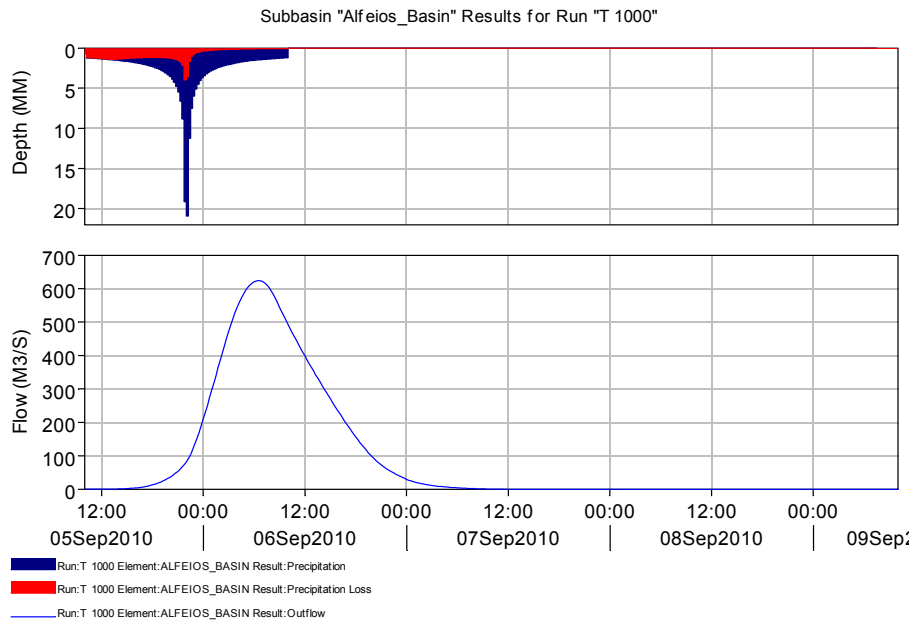
Διάγραμμα 5.5: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h επαναφοράς 20 ετών



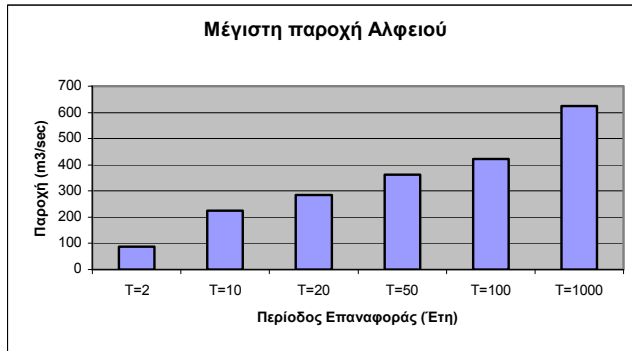
Διάγραμμα 5.6: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h επαναφοράς 50 ετών



Διάγραμμα 5.7: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h επαναφοράς 100 ετών



Διάγραμμα 5.8: Βροχογράφημα και πλημμυρογράφημα σχεδιασμού για επεισόδιο βροχής 24 h επαναφοράς 1000 ετών

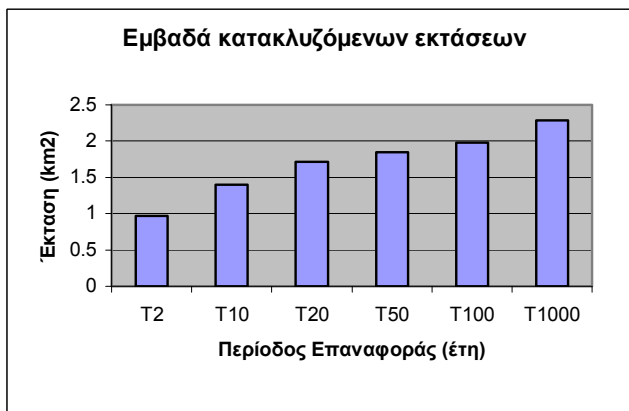


Περίοδος Επαναφοράς	Μέγιστη Παροχή
T=2	86.96204
T=10	225.36665
T=20	283.78973
T=50	361.88271
T=100	421.72625
T=1000	624.01562

Διάγραμμα 5.9: Παροχές αιχμής Αλφειού ποταμού για έξι περιόδους επαναφοράς

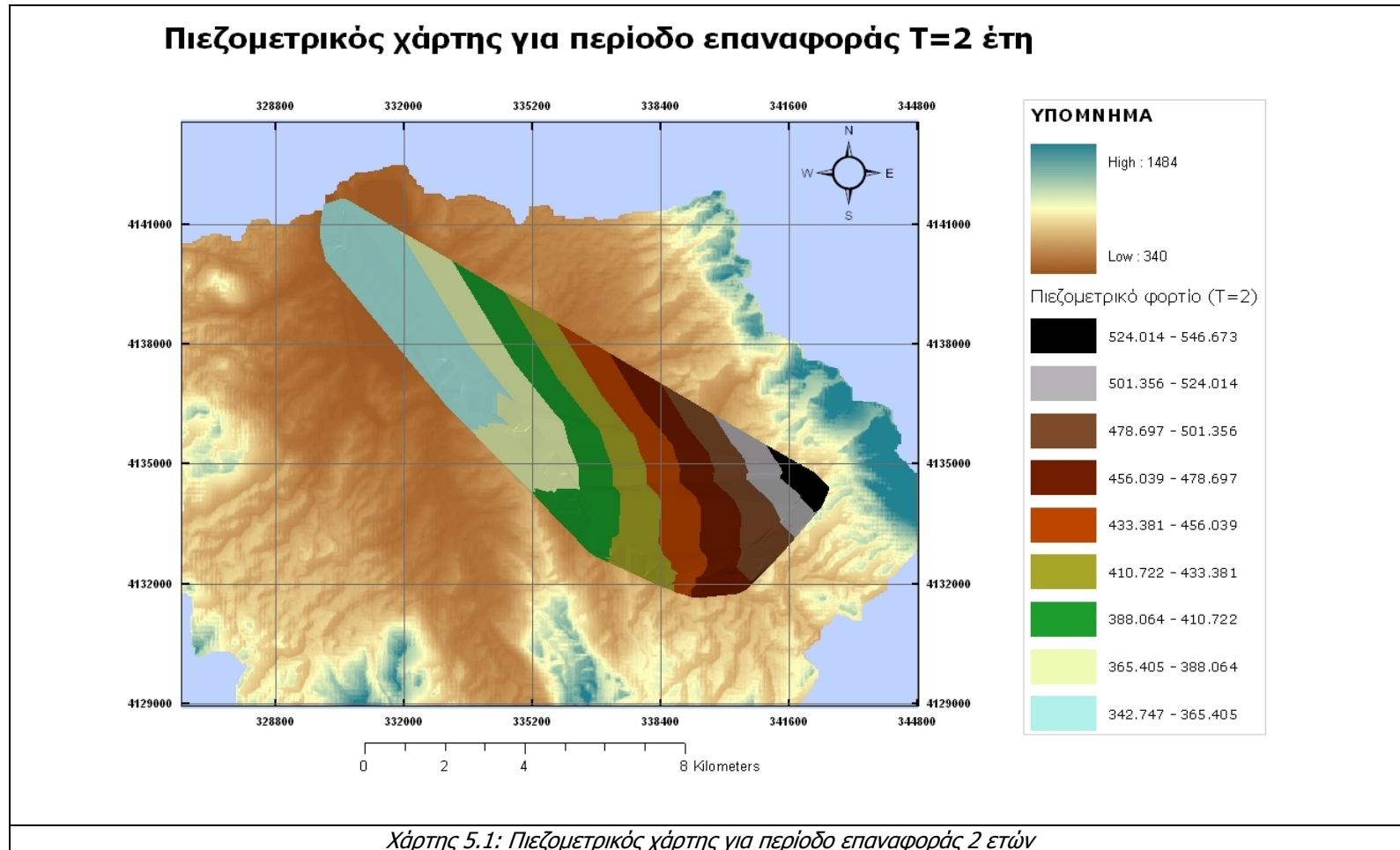
5.2 Πλημμυρική Κατάκλυση Λεκάνης

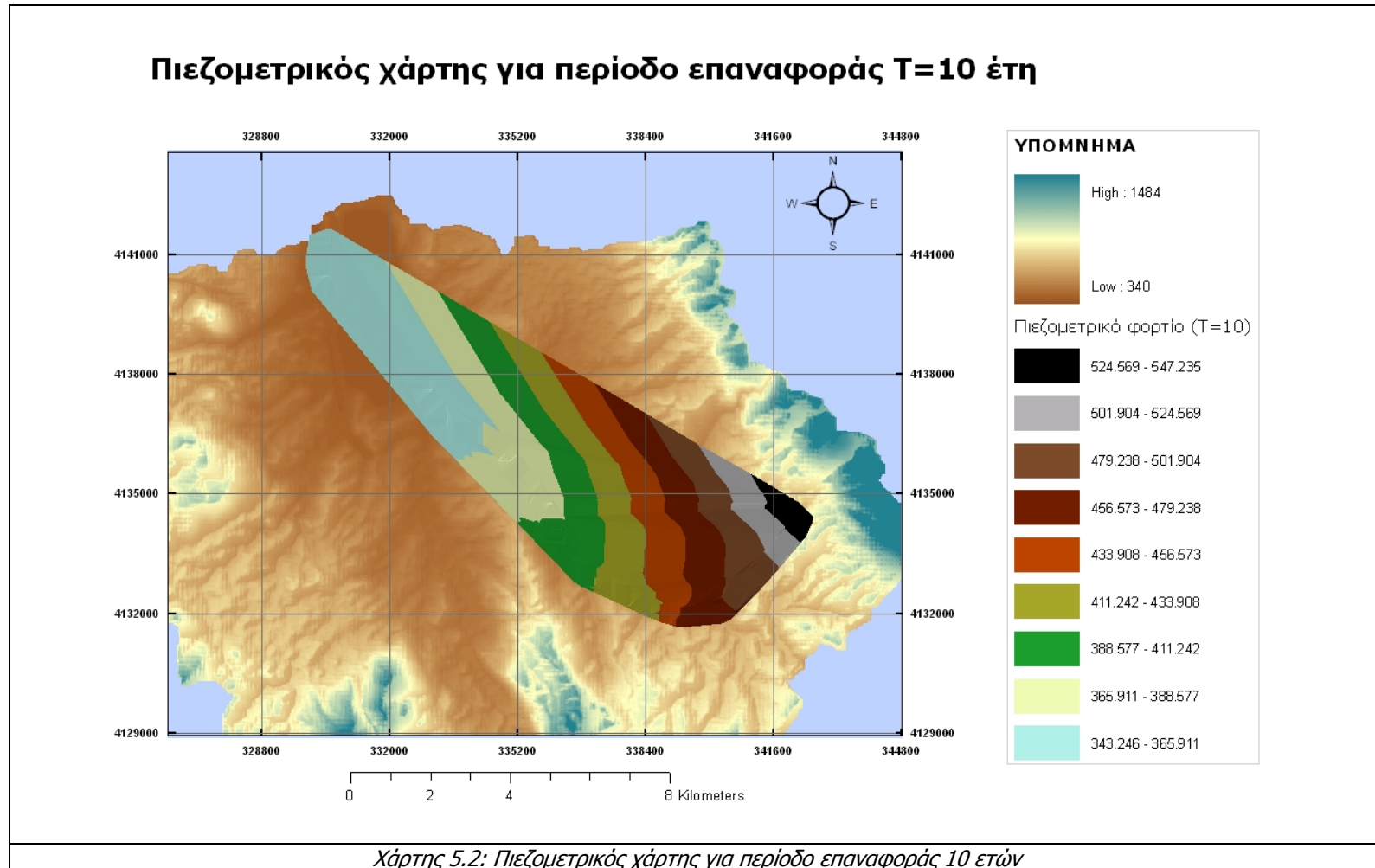
Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζονται τα πλήρη χαρτογραφικά προϊόντα με τα πιεζομετρικά βάθη και τα πολύγωνα των πλημμυρικών κατακλύσεων της λεκάνης για έξι περιόδους επαναφοράς. Επίσης, παρατίθεται ακολούθως πίνακας με σύγκριση του εμβαδού των κατακλυζόμενων εκτάσεων μεταξύ των διαφορετικών πλημμυρικών αποκρίσεων της λεκάνης, ο οποίος καταδεικνύει τον πολύ σημαντικό ρόλο της γεωμορφολογίας του εδάφους (κλίσεις) στην τελική απόκριση.

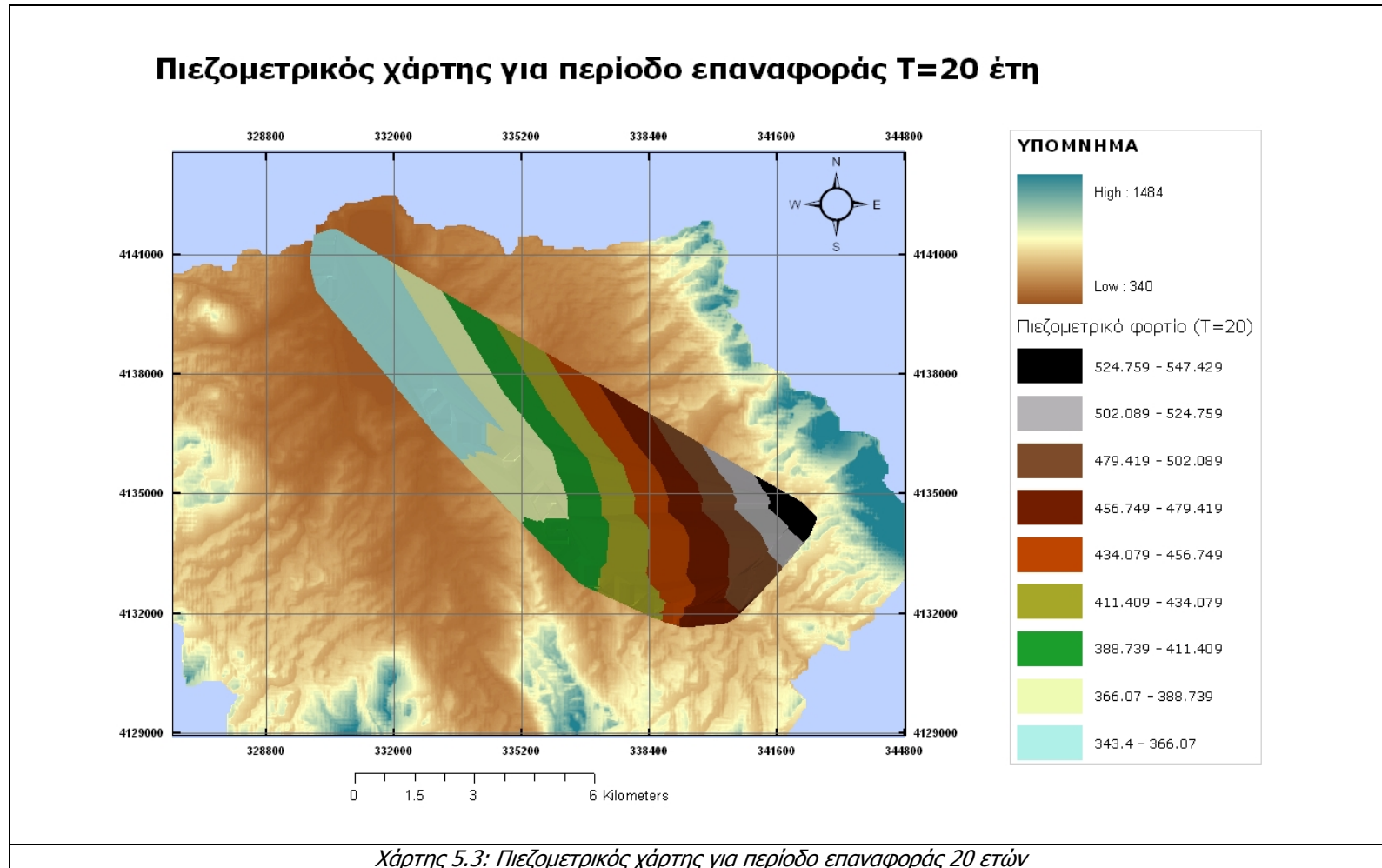


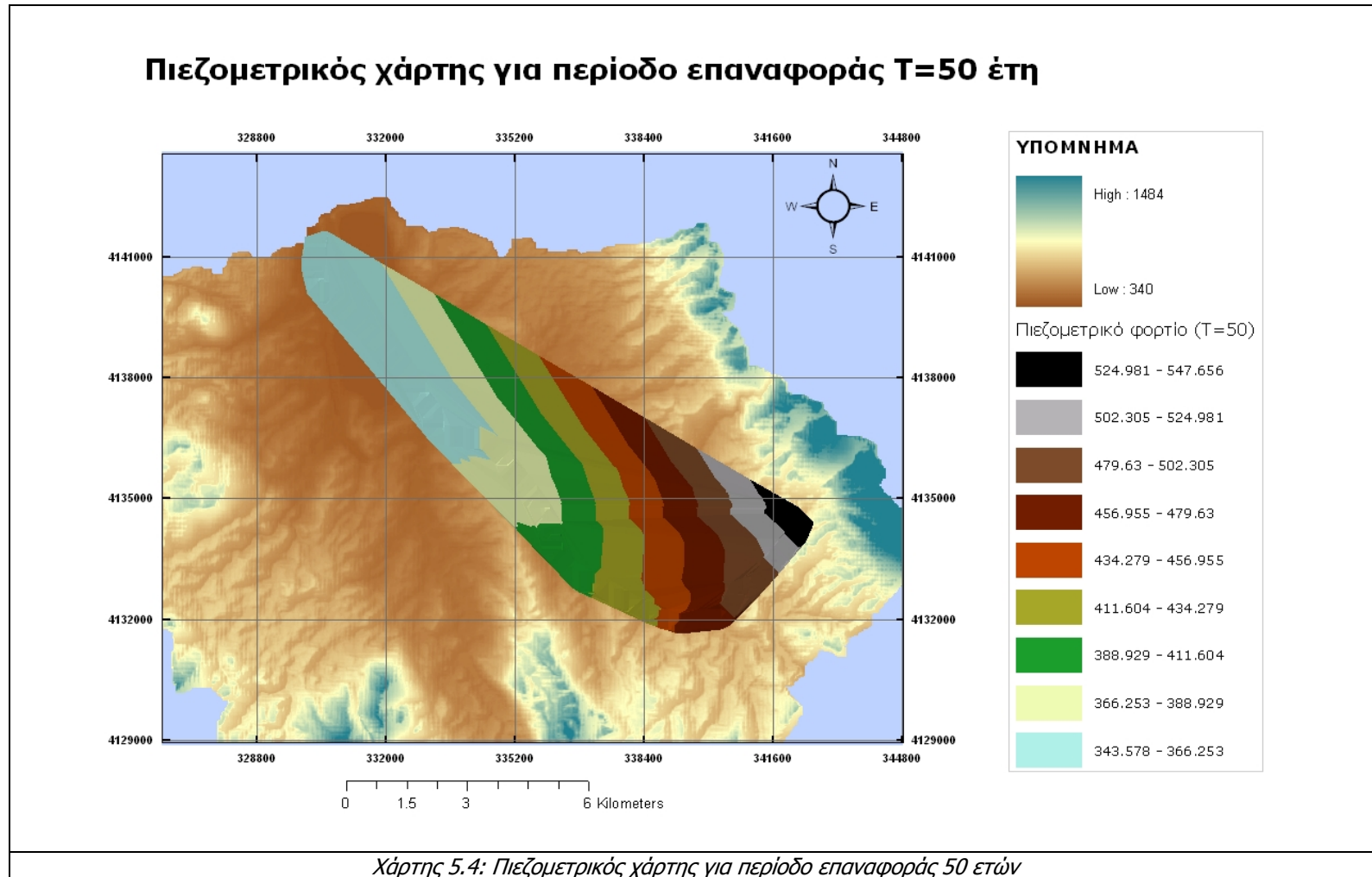
Περίοδος Επαναφοράς (Ετη)	Έκταση (km²)
T2	0.97211047
T10	1.40001461
T20	1.71668069
T50	1.84734628
T100	1.97910954
T1000	2.28284358

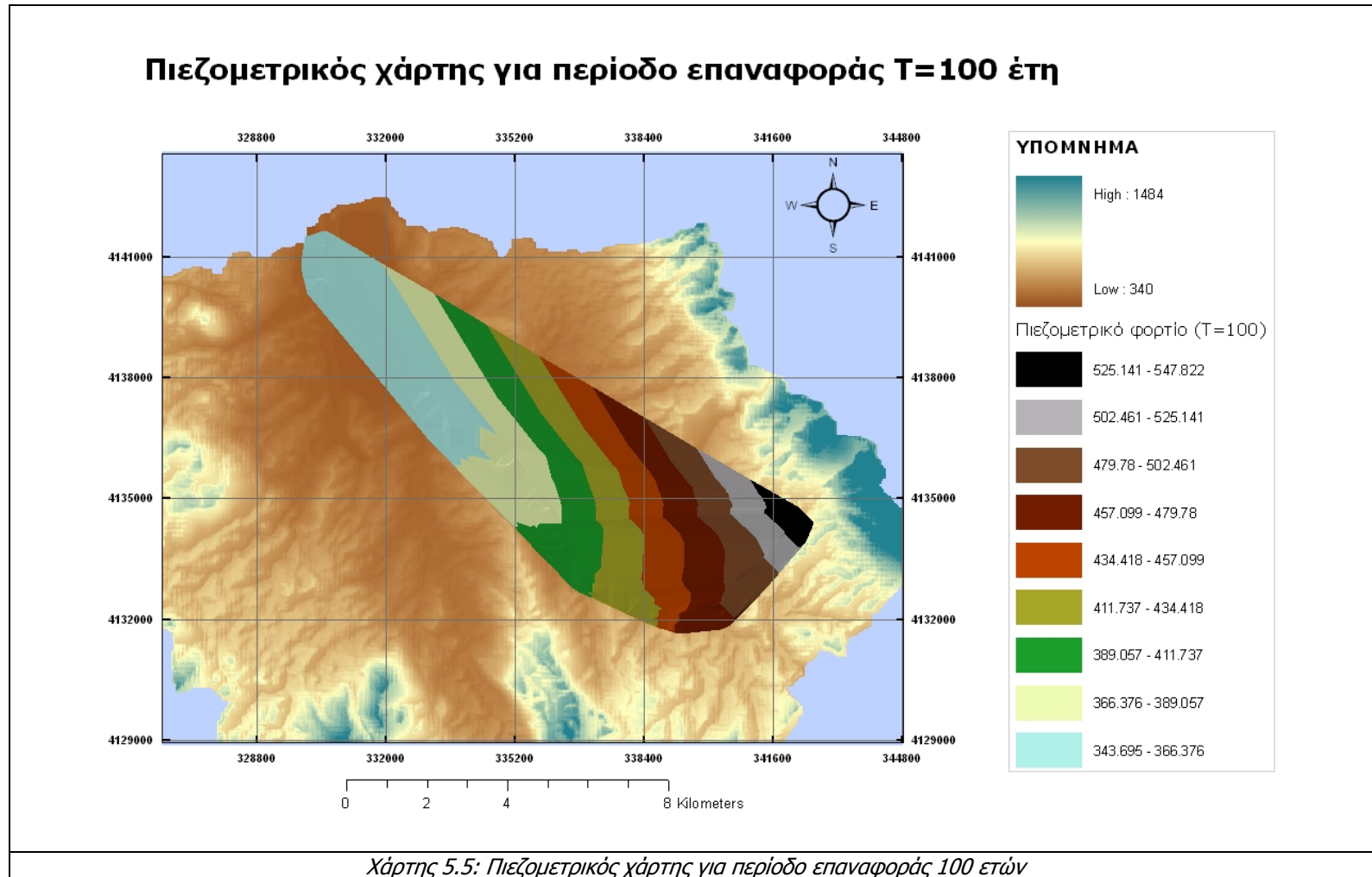
Διάγραμμα 5.10: Εμβαδά κατακλυζόμενων εκτάσεων για έξι περιόδους επαναφοράς

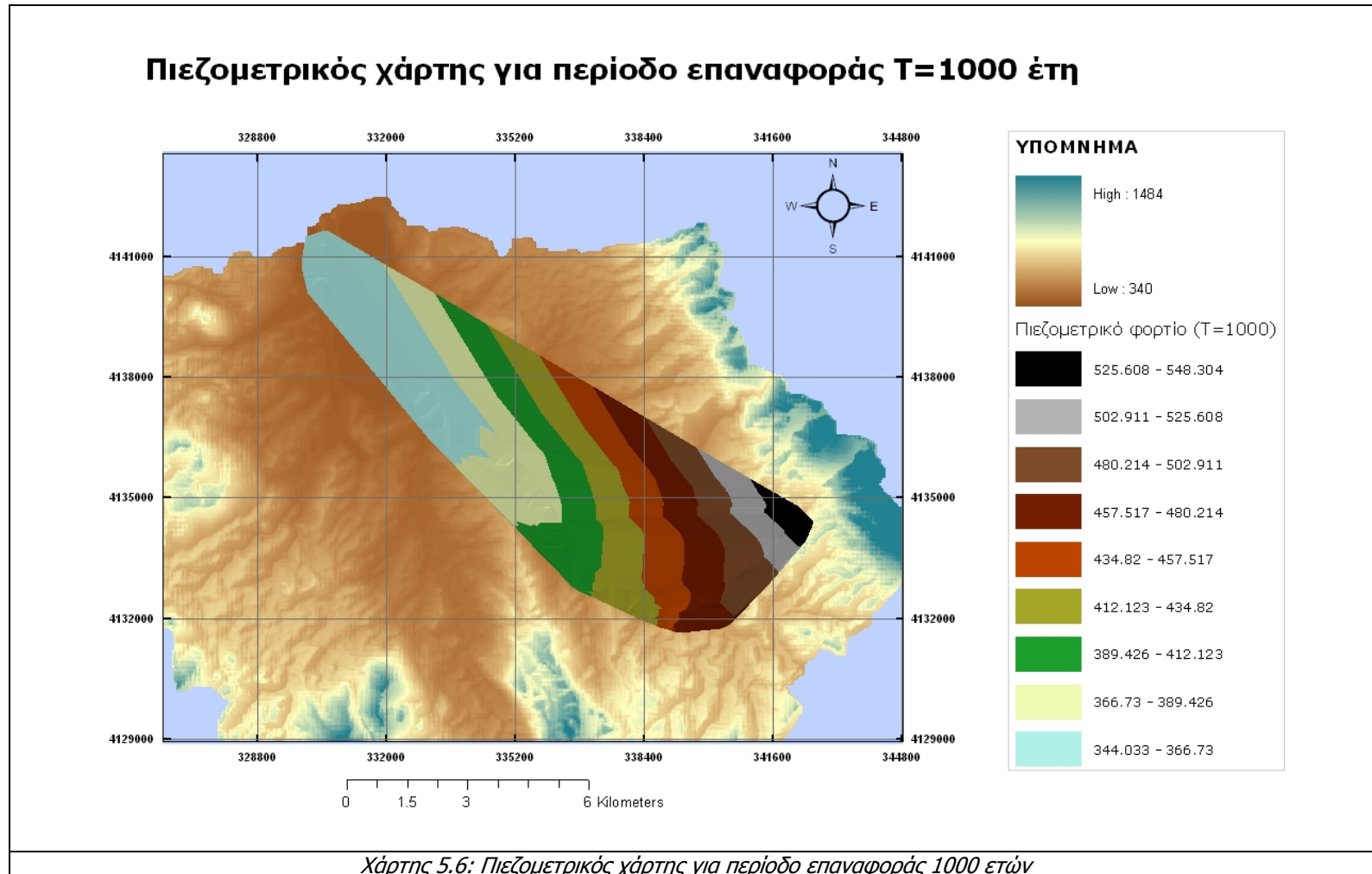


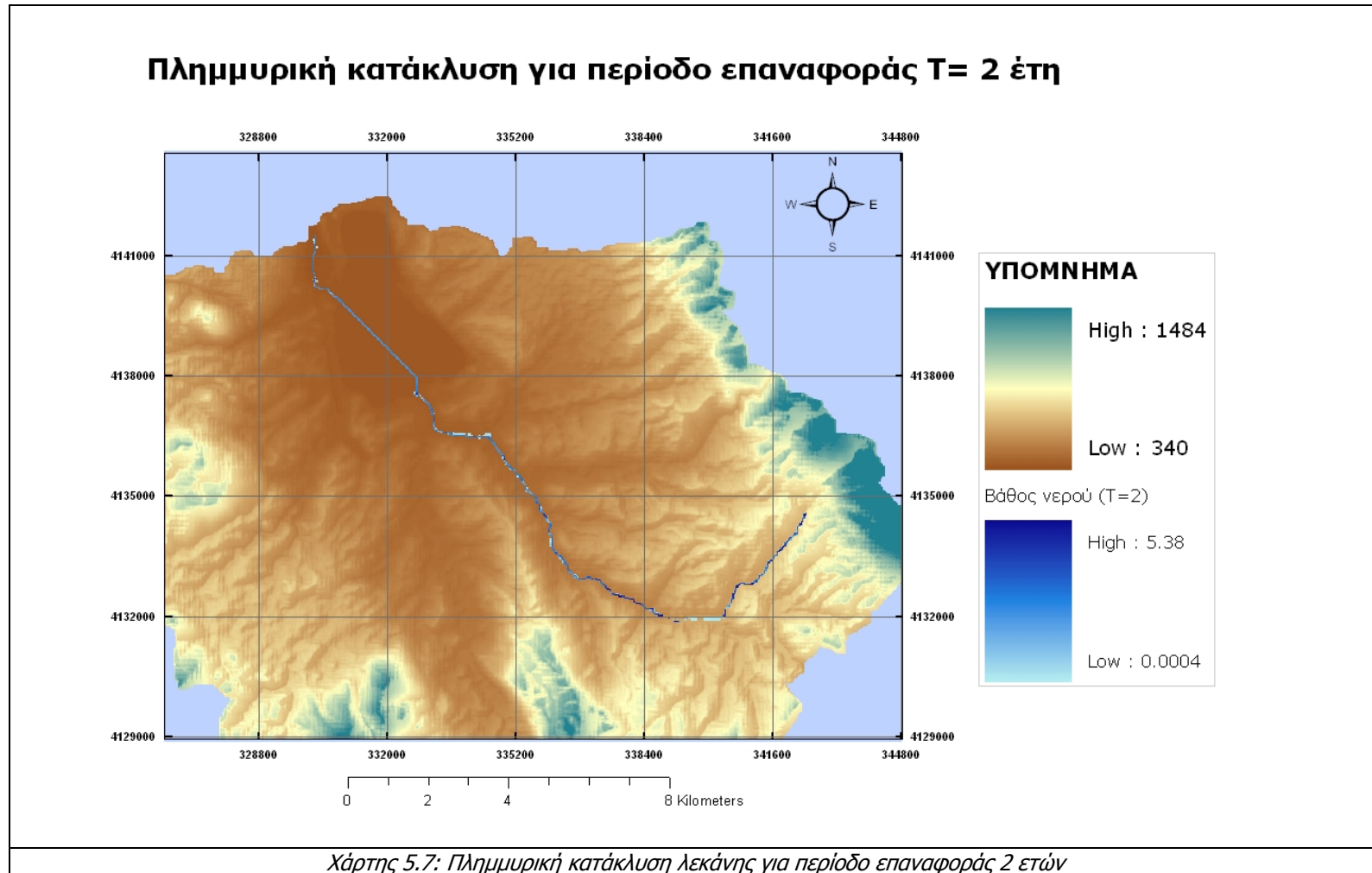


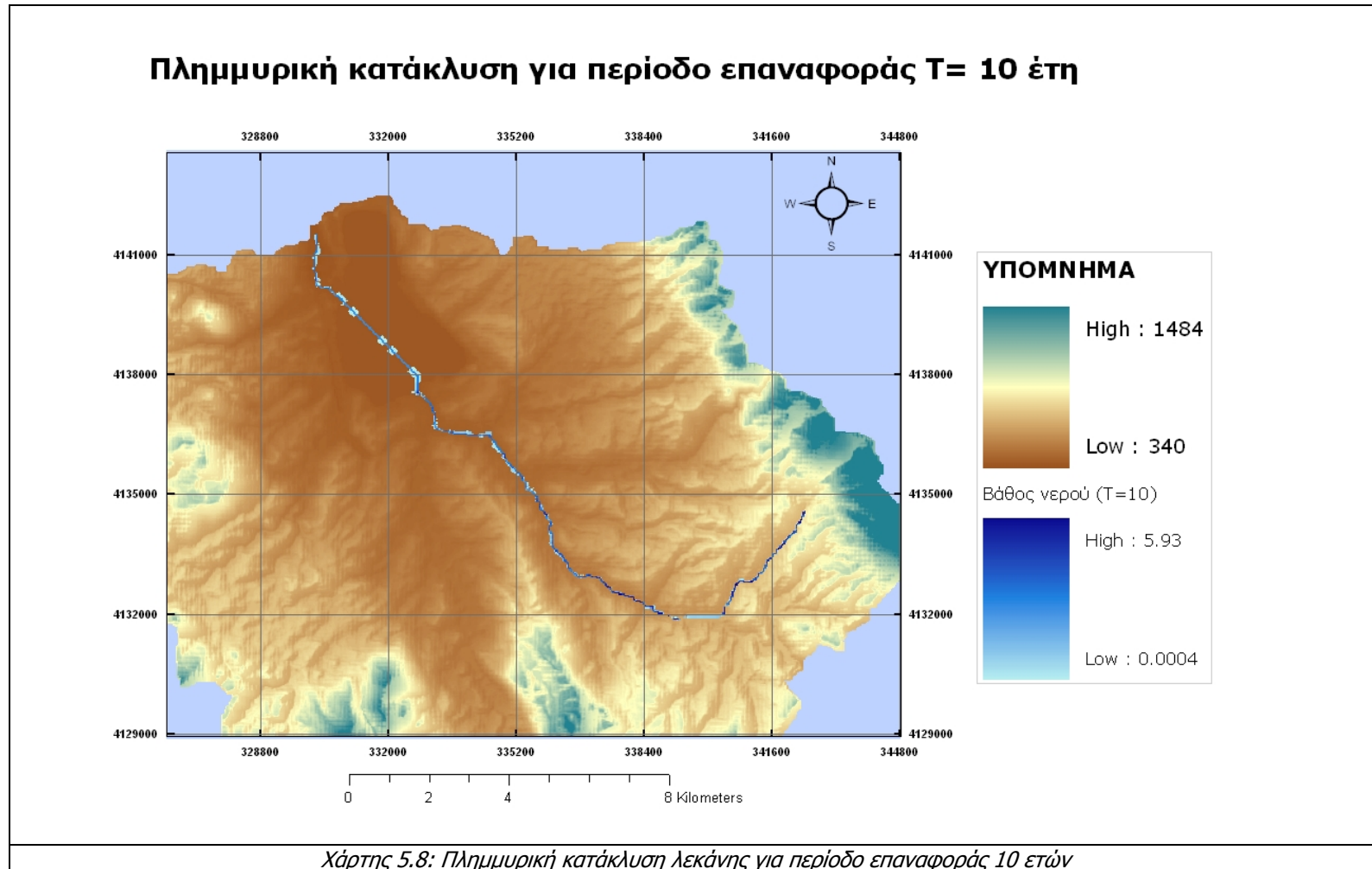


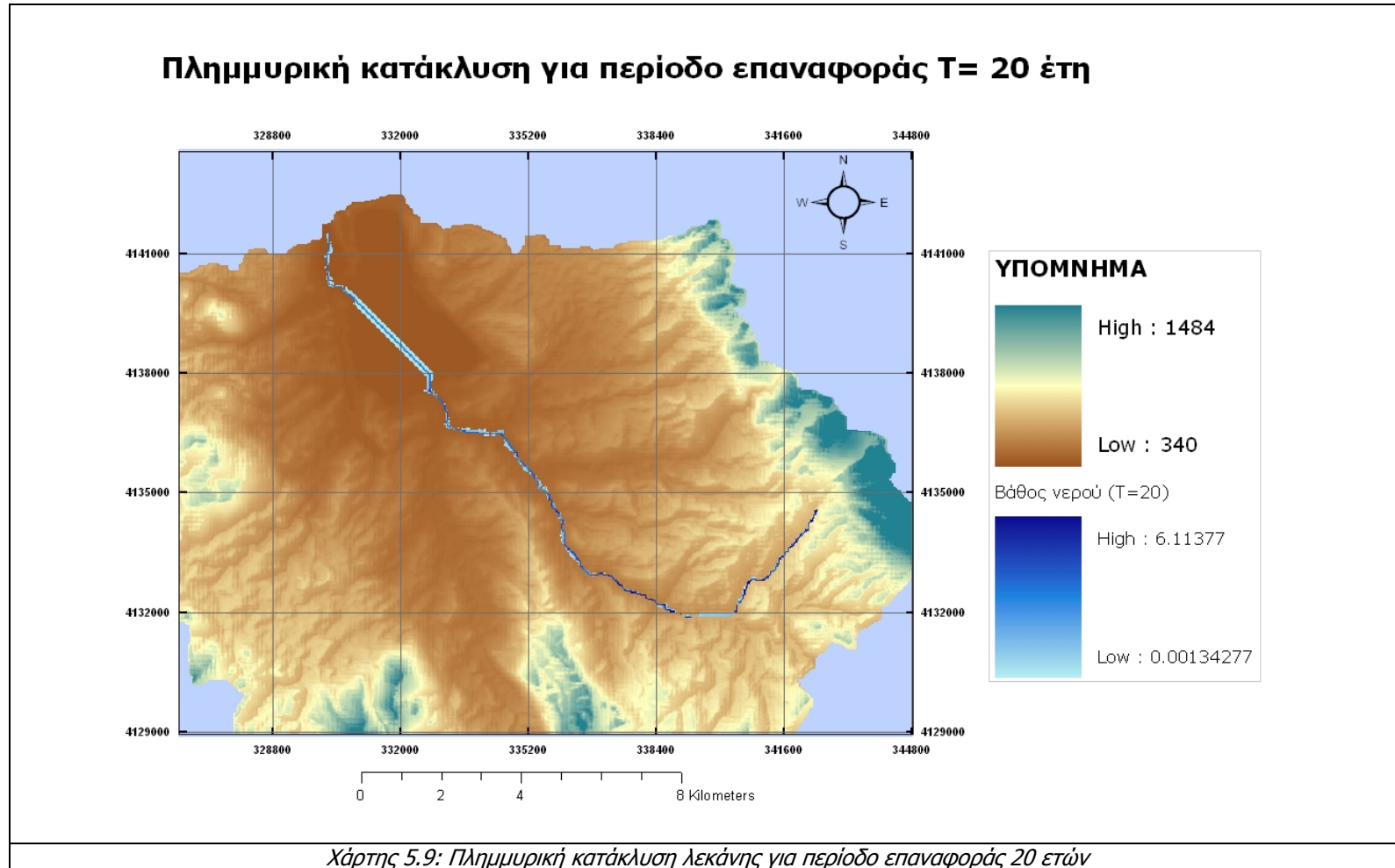


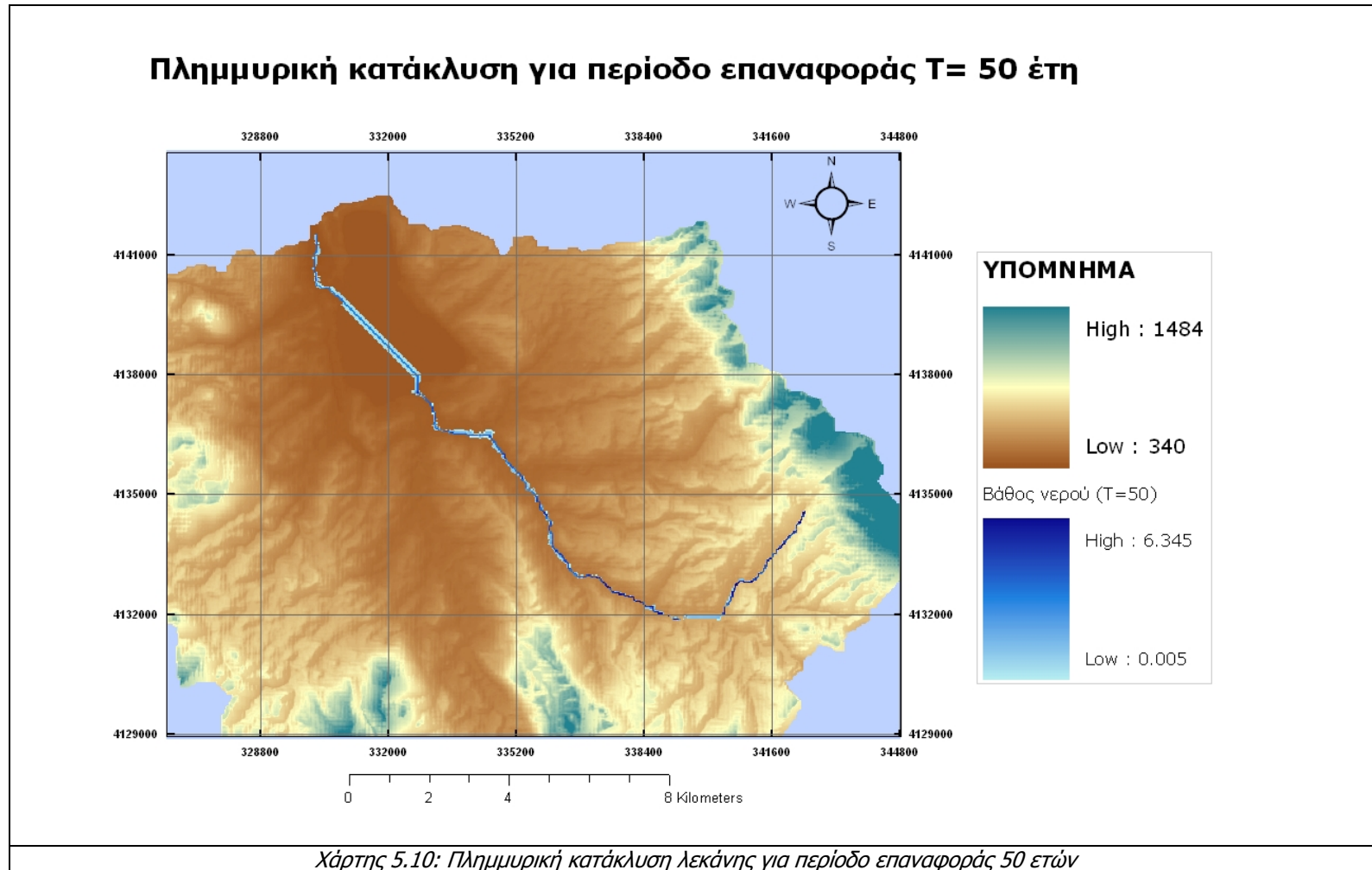


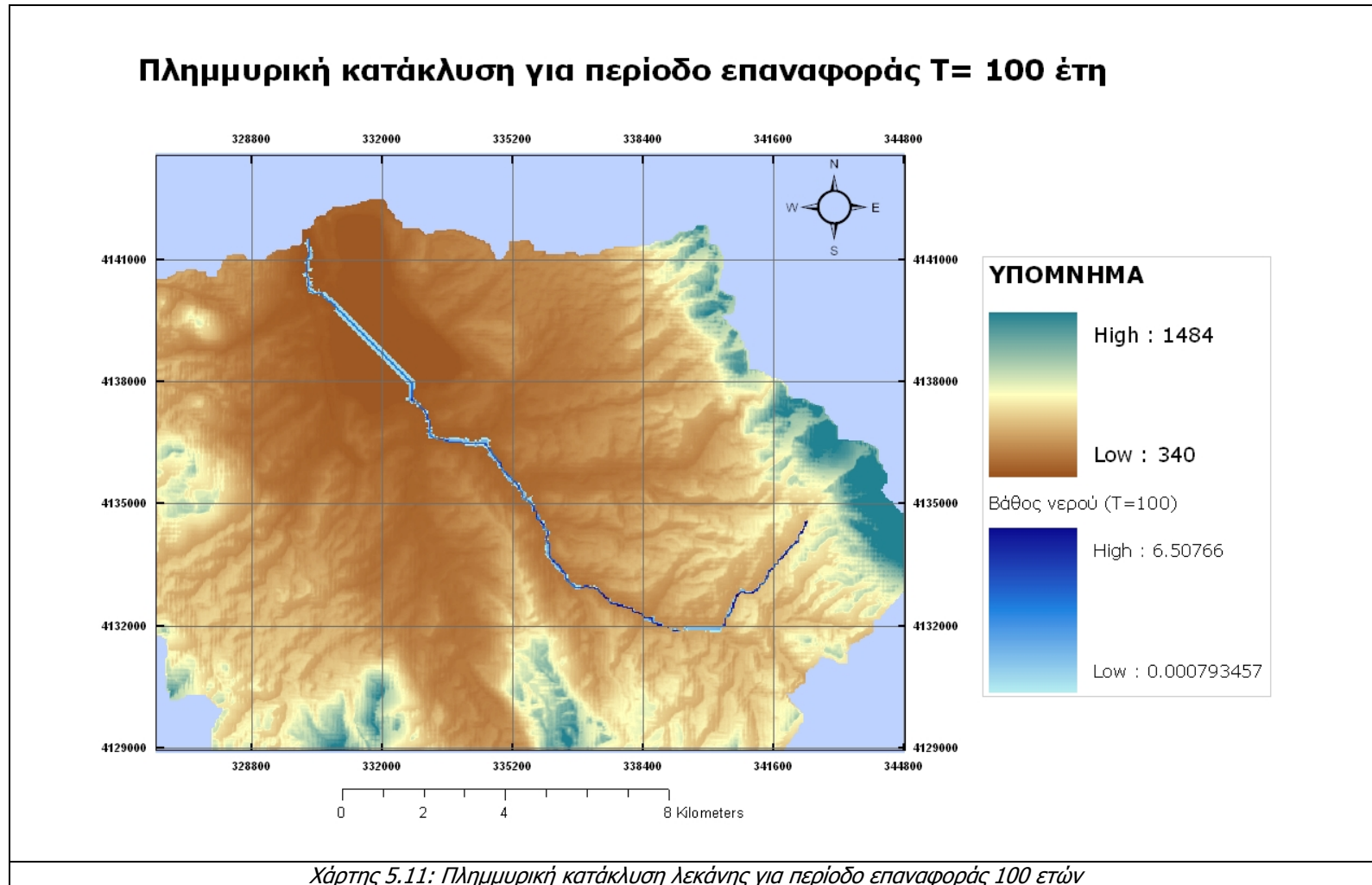


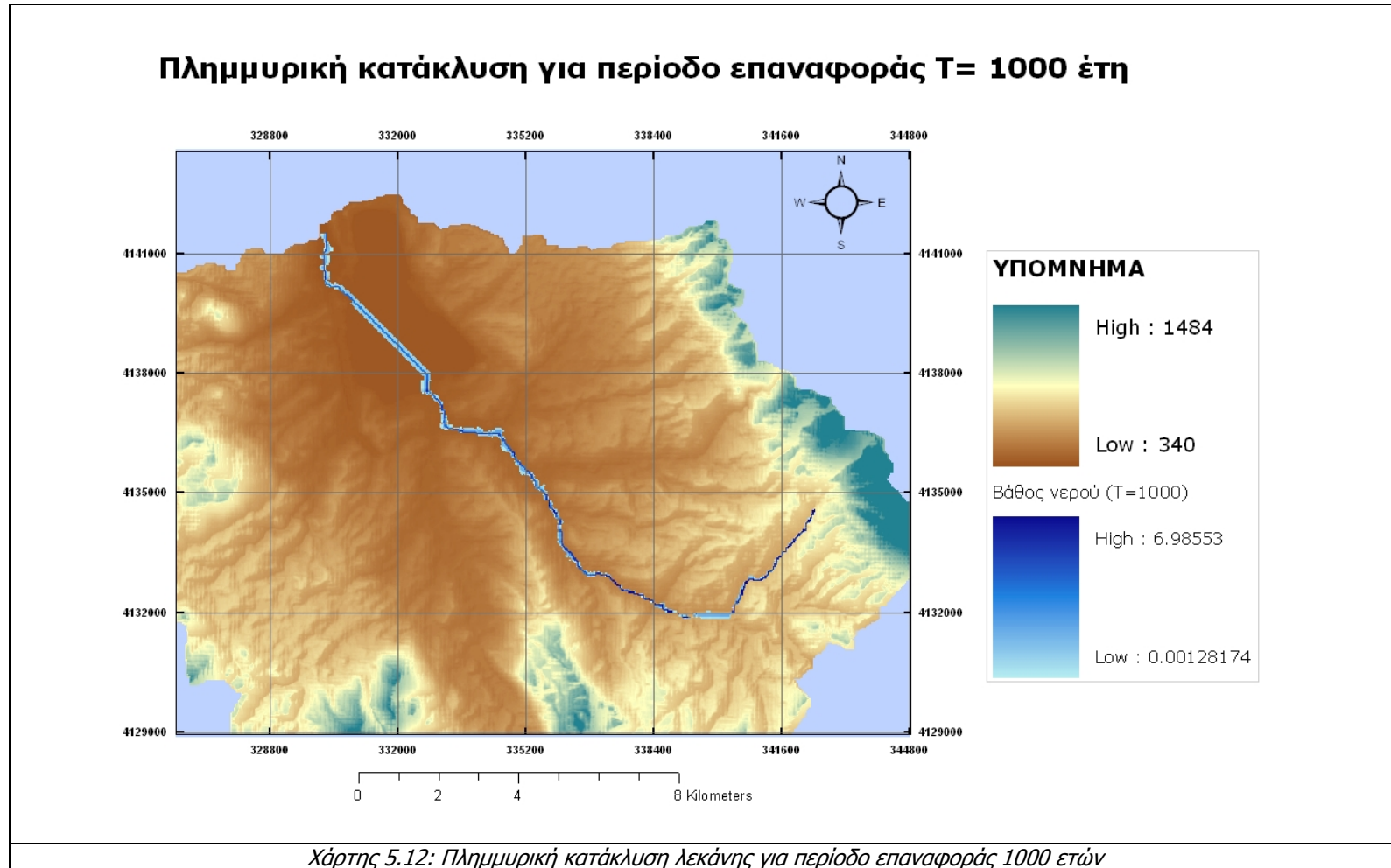












Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

«Science is facts; just as houses are made of stones, so is science made of facts; but a pile of stones is not a house and a collection of facts is not necessarily science.»

Henri Poincare (1854 - 1912)

Περίληψη

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αποτίμηση των αποτελεσμάτων της μεταπτυχιακής εργασίας, ως προς την επίτευξη των αρχικών της στόχων. Επισημαίνονται οι δυσκολίες στην εκπόνηση και η μέθοδος αντιμετώπισης και τέλος, γίνονται προτάσεις μετεξέλιξης.

Θεματικοί Άξονες Κεφαλαίου

- Συμπεράσματα προσομοιώσεων
- Γενική αποτίμηση - Μετεξέλιξη εργασίας

6 Συμπεράσματα

6.1 Γενικά

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η κατάρτιση ενός τυποποιημένου μεθοδολογικού πλαισίου για την εκπόνηση χαρτών πλημμύρας, μέσω της αξιοποίησης υπολογιστικών λογισμικών επεξεργασίας γεωγραφικής, υδρολογικής και υδραυλικής πληροφορίας.

Ως περιοχή μελέτης, επελέγη τμήμα 20 περίπου χιλιομέτρων του Άνω Αλφειού στην ευρύτερη περιοχή της Μεγαλόπολης. Η καρταρισθείσα μεθοδολογία διαχωρίστηκε σε δύο βασικούς άξονες, την υδρολογική και την υδραυλική προσομοίωση για 6 περιόδους επαναφοράς $T=2$, $T=5$, $T=10$, $T=20$, $T=50$, $T=100$, $T=1000$. Τα στάδια για τη σύνθεση της μεθοδολογίας παρουσιάστηκαν αναλυτικά στα κεφάλαια 3 και 4 ενώ στο κεφάλαιο 5 παρατέθηκε επιλογή ενδεικτικών αποτελεσμάτων συνοδευομένων από τα αντίστοιχα χαρτογραφικά προϊόντα τους.

Ακολούθως, αναφέρονται μερικά σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη μεθοδολογία αλλά και τη χρήση των λογισμικών.

6.2 Συμπεράσματα προσομοιώσεων

6.2.1 Υδρολογική προσομοίωση

Η υδρολογική προσομοίωση σχεδιάστηκε και εκτελέστηκε σε περιβάλλον HEC-HMS με τη συμβολή της επέκτασης HEC-GeoHMS του συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS.

Η αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης μελέτης θεμελιώθηκε στην επιλογή προτύπων για τον υπολογισμό των απωλειών βροχόπτωσης και της προκύπτουσας άμεσης απορροής. Παραλήφθηκε εκουσίως η μελέτη της βασικής ροής αλλά και της χωροχρονικής διόδευσης του πλημμυρογραφήματος, αφενός λόγω της έλλειψης των κατάλληλων δεδομένων εισόδου και αφετέρου λόγω της αμελητέας επίδρασής τους στον εξαρχής τεθέντα στόχο της εργασίας για την εκτέλεση υδραυλικής προσομοίωσης του ποταμού Αλφειού βάσει των μεγίστων παροχών της εκάστοτε περιόδου επαναφοράς.

Η επιλογή προτύπων επηρεάστηκε σαφώς από την έλλειψη αξιόπιστων δεδομένων της περιοχής και συνεπώς επελέγη το πρότυπο SCS για τον υπολογισμό

των απωλειών βροχόπτωσης¹¹ και το συνθετικό M.Y Snyder για τον υπολογισμό της άμεσης απορροής¹².

Η προσομοίωση έγινε σε ενιαίο μοντέλο (μια ενιαία λεκάνη) για 6 υετογραφήματα σχεδιασμού, τα οποία προέκυψαν με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων τμηματικών υψών από τις εκτιμηθείσες όμβριες καμπύλες της περιοχής¹³.

Τελικά προϊόντα της προσομοίωσης ήταν τα πλημμυρογραφήματα σχεδιασμού της λεκάνης για τις 6 περιόδους επαναφοράς, από τα οποία προέκυψαν οι αντίστοιχες παροχές αιχμής.

6.2.2 Υδραυλική προσομοίωση

Η υδραυλική προσομοίωση 20 περίπου km του ποταμού Αλφειού σχεδιάστηκε και εκτελέστηκε για 6 περιόδους επαναφοράς σε περιβάλλον HEC-RAS με τη συμβολή της επέκτασης HEC-GeoRAS του συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών ArcGIS.

Το σημαντικότερο πρόβλημα, το οποίο παρουσιάστηκε, αφορούσε στην ακριβή αποτύπωση της κοίτης του ποταμού. Το πρόβλημα αυτό είναι γενικό και αφορά την αδυναμία αποτύπωσης του γεωγραφικού αναγλύφου στην κοίτη σε ανάλυση μεγαλύτερη των ανά 2 μέτρα ισοϋψών καμπύλων. Στα σημεία αδυναμίας αποτύπωσης θα πρέπει να γίνεται επιτόπου αποτύπωση από τοπογραφικό συνεργείο σε επιλεγμένες διατομές και χάραξη μηκοτομής, από την οποία προκύπτουν τα υψόμετρα του πυθμένα σε κάθε σημείο του υδατορεύματος. Έτσι ελέγχονται και διορθώνονται τα αρχικά υπολογισθέντα από το ΨΜΕ υψόμετρα του πυθμένα της κοίτης (Ράμπιας 2007). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε χονδροειδώς με συνεχείς δοκιμές «ανακατάταξης – DEM reconditioning» των υψομέτρων κατά μήκος της κοίτης με βάση το ψηφιοποιημένο υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής.

Μετά την επιτυχή εισαγωγή όλων των γεωμετρικών στοιχείων του ποταμού (μηκοτομή κοίτης, διατομές, όχθες, χρήσεις γης κλπ) έγινε υδραυλική προσομοίωση σε συνθήκες μόνιμης ροής για σταθερή παροχή αιχμής συγκεκριμένης κάθε φορά

¹¹ Ως δεδομένα εισόδου χρειάζονται μόνο ο χάρτης χρήσεων γης και ο υδρολιθικός χάρτης της περιοχής.

¹² Ως δεδομένα εισόδου χρειάζονται γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, τα οποία προκύπτουν εύκολα μέσω της υπολογιστικής διαδικασίας.

¹³ Η εκτίμηση των ομβρίων καμπύλων έγινε με βάση χονδροειδείς παραδοχές και συσχετίσεις με δεδομένες καμπύλες για τη στερεά Ελλάδα (Κοζάνης,2000).

περιόδου επαναφοράς. Το HEC-RAS προσφέρει πλήρη ανάλυση των αποτελεσμάτων καθώς και αναφορά για τυχόν λάθη στην εισαγωγή των υδρολογικών δεδομένων.

Μάλιστα, παρατίθενται και πιθανές αιτίες της πρόκλησης σφαλμάτων καθοδηγώντας το χρήστη στην επιλογή ορθολογικότερων ρυθμίσεων (πχ μεταβολή καθεστώτος ροής από «υποκρίσιμη» σε «υπερκρίσιμη») ή/και προσθήκη νέων δεδομένων (πχ νέες διατομές). Στην παρούσα εργασία, η προσομοίωση εκτελέστηκε σε συνθήκες μόνιμης ροής ελλείψει δεδομένων, που θα καθιστούσαν δυνατή και την προσομοίωση σε μη μόνιμη ροή¹⁴.

Τελικό προϊόν της υδραυλικής προσομοίωσης είναι ο υπολογισμός των πιεζομετρικών βαθών σε κάθε διατομή και εν συνεχεία ο υπολογισμός των πολυγώνων πλημμυρικής κατάκλυσης, όπου το πιεζομετρικό υψόμετρο υπερβαίνει το αντίστοιχο υψόμετρο εδάφους.

6.3 Συμπεράσματα χαρτογράφησης πλημμυρικών κατακλύσεων

Έχοντας ολοκληρώσει την υδρολογική και υδραυλική προσομοίωση για τη λεκάνη και για τον ποταμό μελέτης αντίστοιχα, ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει χάρτες με το εύρος των πλημμυρικών κατακλύσεων ανά περίοδο επαναφοράς.

Η χαρτοσύνθεση έγινε σε περιβάλλον HEC-GeoRAS για 6 περιόδους επαναφοράς, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 5 των αποτελεσμάτων.

Η σύγκριση του πλημμυρικού πεδίου για τις 6 διαφορετικές περιόδους επαναφοράς συνάγει στο συμπέρασμα ότι λόγω των σχετικά έντονων κλίσεων της περιοχής δεν παρατηρείται συσχετιζόμενη αύξηση του εμβαδού κατακλυζόμενης έκτασης με την αυξανόμενη μέγιστη πλημμυρική παροχή (ανά περίοδο επαναφοράς). Για παράδειγμα, συγκρίνοντας τα πλημμυρικά επεισόδια 100 και 1000 ετών, η πλημμυρική έκταση αυξάνεται κατά 14,78% όταν η παροχή αυξάνεται κατά 47,9%.

Τέλος, η επισκόπηση του μέγιστου εγκάρσιου (ως προς την κοίτη) μήκους κατάκλυσης έδωσε μια διακύμανση στην αύξηση της περιόδου επαναφοράς περίπου 80-160 μέτρα (προς το αριστερό ή/και το δεξί τμήμα της εκάστοτε διατομής), κάτι το οποίο επιβεβαιώθηκε και από προσεγγιστικές βιωματικές εκτιμήσεις κατοίκου της περιοχής.

¹⁴ Η προσομοίωση μη μόνιμης ροής απαιτεί ως οριακές συνθήκες τόσο στην πλέον ανάντη όσο και στην πλέον κατάντη διατομή (πχ δεδομένα πλημμυρογράφηματα)

6.4 Συνολική αποτίμηση και προτάσεις μετεξέλιξης της εργασίας

Οι πλημμύρες αποτελούν αναμφίβολα ένα από τα σοβαρότερα και πιο επίκαιρα προβλήματα φυσικών καταστροφών. Η σημασία της εκτίμησης των πλημμυρικών κατακλύσεων μιας περιοχής είναι μεγάλη, ιδίως αν αυτή «φιλοξενεί» ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως αστική ανάπτυξη, γεωργία, κτηνοτροφία κλπ.

Συνεπώς, λογικό επόμενο βήμα μετεξέλιξης της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να είναι η συσχέτιση των χαρτογραφικών προϊόντων πλημμυρικής κατάκλυσης με τις χρήσεις γης της περιοχής με στόχο την εκτίμηση του αναμενόμενου κόστους ζημιών ανά περίοδο επαναφοράς και εν συνεχεία την εκπόνηση χαρτών πλημμυρικής επικινδυνότητας. Με βάση αυτό το «πακέτο» χαρτών μπορούν να καταρτισθούν επιχειρησιακά σχέδια διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου, τα οποία προτείνουν τα καταλληλότερα κατασκευαστικά ή μη κατασκευαστικά μέτρα για την πρόληψη και την ελαχιστοποίηση των δυσμενών συνεπειών του πλημμυρικού επεισοδίου.

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία αποτελεί μια ολοκληρωμένη πρόταση για τη βήμα προς βήμα σύνθεση τυποποιημένης μεθοδολογίας, με στόχο τη χαρτογράφηση του πεδίου πλημμυρικών κατακλύσεων (βάσει της οδηγίας 2007/60/ΕΚ), με εφαρμογή σε επιλεγμένο τμήμα του ποταμού Αλφειού στην Αρκαδία. Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στο σχολιασμό του επιστημονικού υποβάθρου, που διέπει τα αξιοποιηθέντα μοντέλα, ούτως ώστε να υπερτονιστεί η σημασία της κρίσης και της εμπειρίας του μηχανικού κατά τη ρύθμιση των απαραίτητων παραμέτρων.

Βιβλιογραφία



Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία:

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

Κακαβά, Α. (2008), "Πλημμυρική κατάκλυση συμβολής ποταμών Διπόταμου - Μετσοβίτικου", Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών ΕΜΠ, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος.

Κοζώνης, Δ. (1995), Κατάρτιση ομβρίων καμπυλών με ελλιπή δεδομένα. Εφαρμογή στην περιοχή της Στερεάς Ελλάδας. , Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος ΕΜΠ.

Κουτσογιάννης, Δ. και Ξανθόπουλος, Θ. (1999), "Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα".

Λέκκας, Ε. (2009), Φυσικές και Τεχνολογικές Καταστροφές - Εκπαιδευτικό υλικό κατάρτισης στελεχών τοπικής αυτοδιοίκησης, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο, Αθήνα.

Λουκάς, Α. και Μυλόπουλος, Ν. (2005), Εφαρμογές προσομοίωσης σε υδροσυστήματα, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Μιμίκου, Μ. και Μπαλτάς, Ε. (2003), Τεχνική Υδρολογία γ έκδοση 297 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Ντοανίδης, Λ. (2007), "Συγκριτική εφαρμογή του υδρολογικού ομοιώματος HEC-HMS σε ενιαία και ημικατανεμημένη μορφή στη λεκάνη του ποταμού Καλαμά", Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 111 σελίδες.

Ραδαίος, Α. (2006), "Διερεύνηση του πλημμυρικού καθεστώτος του ποταμού Πηνειού και πλημμυρικές κατακλύσεις για διάφορες περιόδους επαναφοράς", Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών ΕΜΠ, Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, 176 σελίδες.

Ράμπιας, Ε. (2007), "Υδραυλική προσομοίωση ποταμού Αλιάκμονα με χρήση του μοντέλου HEC-RAS. Μεταπτυχιακή εργασία ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, 147 σελίδες".

Στάμου, Λ. και Σκοπελίτη, Α. (2009), "Παρουσίαση στο μάθημα «Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών στους Υδατικούς Πόρους» του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»".

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία:

- Bedient, P. and Huber, W. (1992), "Hydrology and floodplain analysis. Addison-Wesley, New York, NY."
- Bruner, G. (2008a), HEC-RAS, river analysis system user's manual, US army corps of engineers, Hydrologic engineering center.
- Bruner, G. (2008b), HEC-RAS, river analysis system hydraulic reference manual, US army corps of engineers, Hydrologic engineering center.
- Feldman, A. (2000), "Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual".
- Gleick, P. (1996), "Water resources. In Encyclopedia of Climate and Weather", Oxford University Press, New York, vol.2, pp.817-823.
- HEC (2003), Geospatial Hydrologic Modeling Extension: User's Manual, US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Centre, Davis, CA.
- Manariotis, I. and Yannopoulos, P. (2001), "Environmental Impact of Riverine Activities on Alfios River and Measures Toward Sustainability, in Proceedings of an International Conference Ecological Protection of the Planet Earth I (ed. V. A. Tsihrintzis and P. Tsalides), 5-8 June 2001, Xanthi, Greece, 1, 131-139."
- Merwade, V. (2008), Watershed and Stream Network Delineation, School of Civil Engineering, Purdue University.
- Ramírez, J. (2000), Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics, Chapter 11 of Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities Eds. Ellen Wohl; Cambridge University Press.

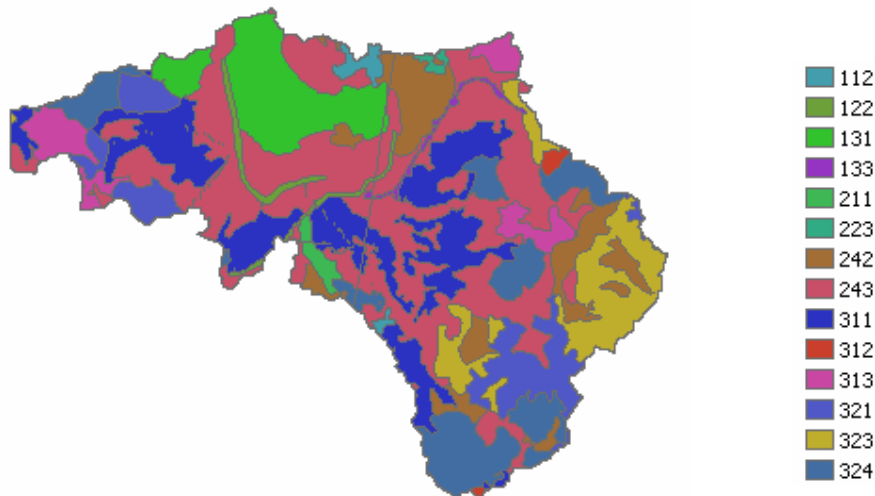
Διαδικτυακοί τόποι:

- <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclegreekhi.html> (US Geological Survey),
- <http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr> (ΕΤΥΜΠ),
- <http://upload.wikimedia.org/>.
- <http://www.minagric.gr/greek/2.9.3.alfeios.html> Ποιοτικά χαρακτηριστικά υδάτων ποταμών και λιμνών, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων.
- <http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/> (EC Project Corine)
- <http://www.itia.ntua.gr/%7Esoulman/icoordstrans> ΕΜΠ, Βιβλιοθήκη μετατροπής γεωδαιτικών συντεταγμένων)

Παράρτημα

Πίνακας Π - 1: Εκδόσεις υπολογιστικών λογισμικών

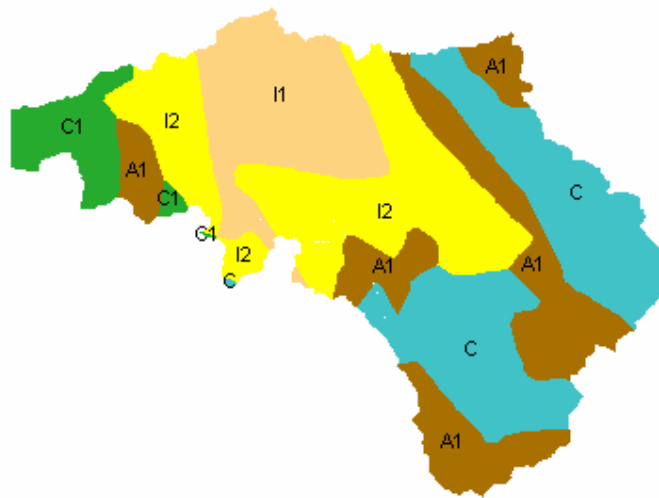
A/A	Μοντέλο - Έκδοση	Περιγραφή ρόλου
1.	HEC-GeoHMS και ArcHydro (ArcGIS 9.2)	Επεξεργασία ψηφιακού μοντέλου εδάφους για τη χάραξη των υπολεκανών απορροής και του υδρογραφικού δικτύου και τον προσδιορισμό των υδρολογικών και γεωμορφολογικών χαρακτηριστικών τους. Παραγωγή αρχείων συμβατών στο HEC-HMS
2.	HEC-HMS (version 3.3)	Υδρολογική απόκριση λεκάνης απορροής. Παραγωγή υδρογραφημάτων και λοιπών υδρολογικών δεδομένων για την εισαγωγή και αξιοποίηση σε περιβάλλον HEC-RAS.
3.	HEC-GeoRAS (ArcGIS9.2)	Επεξεργασία γεωμορφολογικών δεδομένων λεκάνης απορροής και φυσικού υδατορέματος. Παραγωγή αρχείων συμβατών με το HEC_RAS Εισαγωγή αποτελεσμάτων του HEC-RAS για περαιτέρω επεξεργασία και οπτικοποίηση.
4.	HEC-RAS (version 4.0)	Υδραυλική προσομοίωση φυσικού υδατορέματος σε συνθήκες μόνιμης ροής.



Σχήμα Π - 1: Χάρτης χρήσεων γης

Πίνακας Π - 2: Συσχέτιση κωδικών με χρήσεις γης

Landcode	Label1	Label2	Label3
112	Artificial surfaces	Urban fabric	Continuous urban fabric
122	Artificial surfaces	Industrial, commercial and transport units	Road and rail networks and associated land
131	Artificial surfaces	Mine, dump and construction sites	Mineral extraction sites
133	Artificial surfaces	Mine, dump and construction sites	Construction sites
211	Agricultural areas	Arable land	Non-irrigated arable land
223	Agricultural areas	Permanent crops	Olive groves
242	Agricultural areas	Heterogeneous agricultural areas	Complex cultivation patterns
243	Agricultural areas	Heterogeneous agricultural areas	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation
311	Forest and semi natural areas	Forests	Broad-leaved forest
312	Forest and semi natural areas	Forests	Coniferous forest
313	Forest and semi natural areas	Forests	Mixed forest
321	Forest and semi natural areas	Scrub and/or herbaceous vegetation associations	Natural grasslands
323	Forest and semi natural areas	Scrub and/or herbaceous vegetation associations	Sclerophyllous vegetation
324	Forest and semi natural areas	Scrub and/or herbaceous vegetation associations	Transitional woodland-shrub



Σχήμα Π - 2: Υδρολιθικοί τύποι εδάφους

- Φιλίσσης
 Είναι γενικά αδιαπέρατος σχηματισμός. Τοπικά, όπου επικρατούν οι φαμίλιες και τα κροκάλλοπαγή, εμφανίζει μικρή έως μέτρια υδροπερατότητα, με αποκλεισμο την ανάπτυξη περιορισμένης έκτασης υδροφορέων.

- Κοκκώδεις προσχηματικές αποθέσεις κλιμαίνουσας υδροπερατότητας



Περιλαμβάνονται οι σύγχρονες προσχώσεις κοιλιάδων, πεδιάδων και ακτών του Ολοκαίνου, οι λιμναίες χερσαίες και θαλάσσιες αποθέσεις του Πλειστοκαινίου και οι αδιαβροί χερσαίοι και θαλάσσιοι σχηματισμοί του Τριτογενούς. Η υδροπερατότητά τους κυμαίνεται από πολύ μεγάλη έως πολύ μικρή ανάλογα με τη λιθολογική τους σύσταση. Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται:

- Σχηματισμοί με μεγάλη υδροπερατότητα
 - * Κροκαλοπαγή (Βόρεια και Δυτική Πελοπόννησος)
 - * Εκτεταμένοι κώνοι κορημάτων και αλλουβιακά ριπίδια
 - * Αδρόκοκκας αποθέσεις (περιοχές Δέλτα Μόρνου και Εύηρου, Καλοβίαν - Αγρινίου, Δυτικής Θεσσαλίας, Τριτογενούς Ανατολικής Θεσσαλίας, Λεκάνη Κατερίνης, Μέσος Ροός Σπερχειού κλπ.)
- Σχηματισμοί με μεγάλη έως μικρή υδροπερατότητα
 - * Αδρόκοκκας έως λεπτοκοκκας αποθέσεις κροκαλιών, χαλικών, άμμου, ιλύος που απαντώνται στις χερσαίες περιοχές πεδιάδων και τις παράκτιες δελταϊκές περιοχές (Μόρνος, Εύηρος, Αλιάκμονας, Αίγιος Γαλλικός, Νέστος, Έβρος, Αραχθός, Πηνειός, Ηλείας, Αλαφίος, Δυτική Θεσσαλία κλπ.)
- Σχηματισμοί με μικρή έως πολύ μικρή υδροπερατότητα
 - * Λεπτοκοκκας αποθέσεις άμμου, ιλύος και αργιλοίλου (κεντρικές περιοχές πεδιάδων Καμαΐδας, Ισπανίνων, Τριπόλης, Δέλτα κάτω Αχελώου, Ανατολική Θεσσαλία κλπ.)

Γενικά τις Τριτογενείς αποθέσεις διατρέφουν μεγάλα ποτάμια και χείμαρροι, που τροφοδοτούν τους ελεύθερους υδροφόρους. Οι αποθέσεις αυτές αναπτύσσονται, κυρίως, κατά τη ροή των ποταμών και των χείμαρρων. Συνήθως κατά τη διαδρομή των ποταμών από το εσωτερικό πεδινό τμήμα προς το δέλτα τους οι ελεύθεροι υδροφόροι, που αναπτύσσονται στις Τριτογενείς αποθέσεις μετακινούνται σε μερικούς υπό πίεση και τελικά σε υπό πίεση. Η τροφοδοσία των υδροφόρων που αναπτύσσονται στις τεταρτογενείς αποθέσεις, εξαρτάται και από τη λιθολογική τους σύσταση.

Ειδικότερα, για τα συνεκτικά κροκαλοπαγή και τους παλιούς κώνους κορημάτων, που αναπτύσσονται στις υπάρες των ανθρακικών ορεινών όγκων, η τροφοδοσία τους γίνεται τόσο από άμεση κατεύθυνση, όσο και από πλευρικές με ταγγίσεις των καρστικών υδροφόρων συστημάτων, με τα οποία σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν ενιαίο υδρογεωλογικό σύνολο.

- Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα εκτεταμένης ανάπτυξης, μέτριας έως υψηλής υδροπερατότητας



Περιλαμβάνονται οι ακόλουθοι ανθρακικοί σχηματισμοί των διαφόρων γεωτεκτονικών ζωνών, απείρων και ενόσθων:

- Ασβεστόλιθοι, δολομίτες του Ησκαίνου - Κρητιδικού, Λιαιοού-Τριαδικού των ζωνών Παξών και Ιονίου.
- Ασβεστόλιθοι κλακώδεις του Ησκαίνου - Εσπονίου, ασβεστόλιθοι άστρατοι του Ιουραϊκού - Τριαδικού, ασβεστόλιθοι Πλακώδεις του Ησκαίνου - Ιουραϊκού της ημιαπομορφωμένης σειράς Πελοποννήσου - Κρήτης
- Ασβεστόλιθοι, δολομίτες του Ησκαίνου - Μεσοζωϊκού της ζώνης Γαβρόβου - Τριπόλεως.
- Μάρμαρα, δολομίτες του Μεσοζωϊκού της Βνότιας Οσσας.
- Ασβεστόλιθοι του Κρητιδικού της ζώνης της Πίνδου, εκεί όπου εμφανίζονται μεγάλη επιφανειακή ανάπτυξη (περιοχές κεντρικής Πελοποννήσου).
- Ασβεστόλιθοι, δολομίτες του Ησκαίνου - Μεσοζωϊκού της ζώνης Παρνασσού - Γκιτώνας.
- Ασβεστόλιθοι, δολομίτες και μάρμαρα του Μεσοζωϊκού της Πελαγονικής ζώνης.
- Ασβεστόλιθοι του Κρητιδικού, ασβεστόλιθοι και μάρμαρα του Ιουραϊκού - Τριαδικού των ζωνών Αίγιού και Περιβοιωτικής.
- Μάρμαρα, κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι των μαζών Ροδόπης, Σερβομακεδονικής και Κυκλάδων.

Οι παραπάνω ανθρακικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν γενικά έντονη καρστικοποίηση λόγω της χημικής διάβρωσής τους, που ποικίλλει μεταξύ ασβεστόλιθων και δολομιτών. Η συνήθως μεγάλη επιφανειακή τους ανάπτυξη, η έντονη τεκτονική τους καταπόνηση, η λιθολογική τους σύσταση και η στρωματογραφική τους δομή συντελούν στην ανάπτυξη πορώδους ραγμών και ασυνεχιών (δευτερογενές πορώδες), με αποτέλεσμα η υδροπερατότητά τους να κυμαίνεται από μέτρια ως υψηλή.

Η μεγάλη επιφανειακή τους εξάσκωση ευνοεί την ανάπτυξη εκτεταμένων καρστικών συστημάτων. Ανάλογα με την τεκτονική δομή των καρστικών συστημάτων δημιουργούνται επιμέρους υδρογεωλογικές ενότητες, που μπορεί να εκφορτίζονται σε διαφορετικά επίπεδα. Σε πολλές περιπτώσεις τα καρστικά συστήματα εκφορτίζονται με πηγές υπεράφρασης (εσωτερικές λεκάνες) ή με παράκτιες και υποθαλάσσιες πηγές.

- Κοκκώδεις μη προσχηματικές αποθέσεις μέτριας έως πολύ μικρής υδροπερατότητας



Περιλαμβάνουν κλειο-κλειστοκαϊνικές αποθέσεις και τριτογενείς γεωλογικούς σχηματισμούς που συνίστανται από εναλλαγές άμμου, μαργών, αργίλων, κροκαλοπαγών, μαργαϊκών ασβεστολιθών και ψαμιτών. Τοπικά εμφανίζονται στρώματα λιγνιτών και γύψων.

Οι ανωτέρω σχηματισμοί εμφανίζουν γενικά μέτρια έως μικρή υδροπερατότητα, ανάλογα με την συμμετοχή χονδροκόκκου ή λεπτομερούς υλικού. Στις κλειστοκαϊνικές και νεογενείς αποθέσεις αναπτύσσονται κυρίως επίλληλοι υπό πίεση υδροφόροι.

- Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα περιορισμένης ανάπτυξης, κλιμαίνουσας υδροπερατότητας.



Περιλαμβάνονται οι ακόλουθοι ανθρακικοί σχηματισμοί των διαφόρων γεωτεκτονικών ζωνών, απείρων, μαζών και ενόσθων που εναλλάσσονται με ημιαπομορφωμένους ή αδιαβροτούς σχηματισμούς:

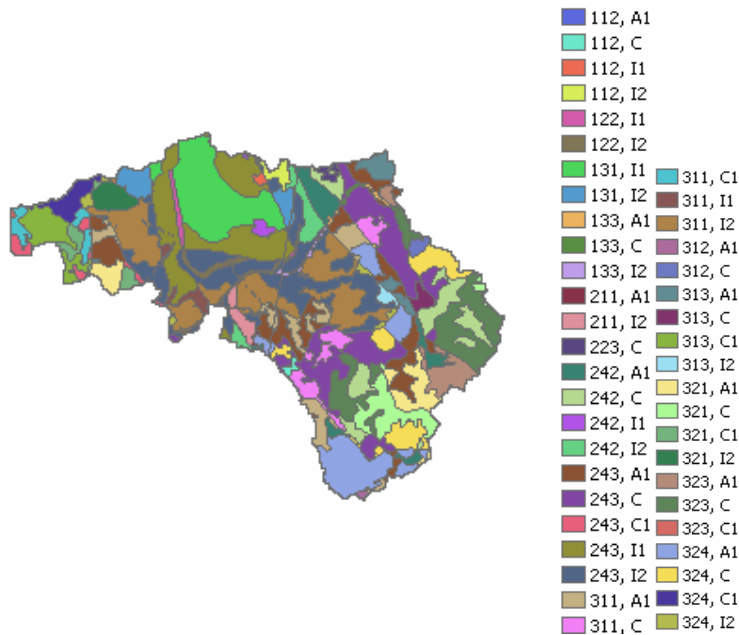
- Ασβεστόλιθοι κλακώδεις, με εναλλαγές περιτολιθών και σχιστολιθών του Κατώτατου Κρητιδικού - Ανώτατου Ιουραϊκού των ζωνών Παξών και Ιονίου
- Ασβεστόλιθοι κλακώδεις με εναλλαγές περιτολιθών και σχιστολιθών του Κατώτατου Κρητιδικού - Ανώτατου Ιουραϊκού της ημιαπομορφωμένης σειράς Πελοποννήσου - Κρήτης
- Ασβεστόλιθοι λεπτοκλακώδεις με εναλλαγές κηλιτών, ραδιολιθιτών, κερατολιθών και φλόσχη του Μεσοζωϊκού της ζώνης της Πίνδου. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι διακεταγμένοι υπό μορφή επίλληλων λεκάνων.
- Ασβεστόλιθοι και μάρμαρα με εναλλαγές στυρολιθών, κρητολιθών, κηλιτών, ψαμιτών και φαλιτών του Μεσοζωϊκού των ζωνών Αίγιού και Περιβοιωτικής
- Μάρμαρα και σπολιφίτες με εναλλαγές γυψοίων και σχιστολιθών των μαζών Ροδόπης, Σερβομακεδονικής, Πελαγονικής και Κυκλάδων.

Οι παραπάνω ανθρακικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν μέτρια καρστικοποίηση λόγω της χημικής διάβρωσής τους, που περιορίζεται εξαιτίας των εναλλαγών με ημιαπομορφωμένους ή αδιαβροτούς σχηματισμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ροή του υπόγειου νερού να ελέγχεται από τις παρεμβολές των αδιαβροτών σχηματισμών (φλόσχη, σχιστολιθοί, κερατολιθοί) και από τις μεγάλες τεκτονικές γραμμές (επιρροές, λεπτοσίτες).

Χαρακτηριστικό των περιοχών με ανάπτυξη αυτού του τύπου καρστικών σχηματισμών είναι η ανάπτυξη εκτεταμένων υδρογεωλογικών λεκανών με εμφάνιση πολλών πηγών, κυρίως επαφής, σε διαφορετικά υψόμετρα και η ανάπτυξη υπό πίεση υδροφόρων λόγω της τεκτονικής δομής τους, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στην κίνηση του υπόγειου νερού.

Πίνακας Π - 3: Κατάταξη τύπων εδάφους σε υδρολογικές ομάδες¹⁵

CODE	pctA	pctB	pctC	pctD
C1	0	0	50	50
I2	0	50	50	0
A1	0	0	0	100
C	50	50	0	0
I1	0	0	50	50



Σχήμα Π - 3: Χάρτης τομής χρήσεων γης με υδρολιθικούς τύπους εδαφών

Πίνακας Π - 4: Απόδοση τιμών CN σε συνδυασμούς χρήσης γης με υδρολογική ομάδα εδάφους

LUValue	A	B	C	D
112	77	85	90	92
122	72	82	87	89
131	81	88	91	93
133	81	88	91	93
211	49	69	79	84
223	45	64	75	84
242	72	75	80	84
243	62	71	78	81
311	35	57	74	80
312	25	55	72	77
313	30	60	71	80
323	46	68	84	89
324	39	61	74	80
321	48	70	83	88

¹⁵ Η κατάταξη έγινε με βάση τον πίνακα 3.5 των Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλου (1999).